

Erik Sachsenweger

**Magnetische Lagerung eines scheibenförmigen  
ferromagnetischen Läufers.**

**DIPLOMARBEIT**

**HOCHSCHULE MITTWEIDA**

---

**UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES**

Fakultät Elektro- und Informationstechnik

Mittweida, 2010

Erik Sachsenweger

**Magnetische Lagerung eines scheibenförmigen  
ferromagnetischen Läufers.**

eingereicht als

**DIPLOMARBEIT**

an der

**HOCHSCHULE MITTWEIDA**

---

**UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES**

Fakultät Elektro- und Informationstechnik

Chemnitz, 2010

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Klaus Müller

Zweitprüfer: Prof. Dr. sc. techn. Dr. h.c. Peter-Klaus Budig

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

## **Bibliographische Beschreibung und Referat**

### **Bibliographische Beschreibung:**

Sachsenweger, Erik:

Magnetische Lagerung eines scheibenförmigen ferromagnetischen Läufers. - 2010. 77 S.  
Mittweida, Hochschule Mittweida - University Of Applied Sciences, Fakultät Elektro- und Informationstechnik, Diplomarbeit, 2010

### **Referat:**

Ziel dieser Arbeit ist es, den Unterschied zwischen der magnetischen Lagerung einer Scheibe und der einer Welle aufzuzeigen. Von Interesse sind die verschiedenen Konstruktionsmöglichkeiten und Ausführungen. Zur Überprüfung der theoretischen Betrachtungen soll ein Versuchsmodell angefertigt werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit dienen als Grundlage der Dimensionierung für die magnetische Lagerung eines Zwirnrings.

# **I Vorwort**

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Diplomandentätigkeit bei der Elektrische Automatisierungs- und Antriebstechnik GmbH (EAAT GmbH) in Chemnitz.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. sc. techn. Dr. h.c. Peter-Klaus Budig für die außerordentlich interessante Aufgabenstellung und seine Unterstützung.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Müller von der Fachhochschule Mittweida für seine Unterstützung und die Betreuung dieser Arbeit. Außerdem gilt mein Dank Herrn Dipl. Ing. Marcus Paditz für seine Unterstützung als betrieblicher Betreuer. Ich bedanke mich auch den Doktoren und Ingenieuren der EAAT für anregende Diskussionen und ihrer fachlichen Kompetenz. Darüber hinaus bedanke ich mich bei den Mitarbeitern der Werkstatt der EAAT für ihre Unterstützung beim Modellbau.



## **Aufgabenstellung und Zielsetzung**

„Magnetische Lagerung eines scheibenförmigen ferromagnetischen Läufers.“

In der Firma Elektrische Automatisierungs- und Antriebstechnik GmbH in Chemnitz werden schon seit Jahren erfolgreich Wellen magnetisch gelagert. Im Rahmen eines Kundenauftrages soll untersucht werden ob die magnetische Lagerung eines Kreisringes möglich ist. Dieser soll später Anwendung als Zwirnring für die Herstellung eines Hütenzauns finden. Mit Hilfe des Zwirnrings werden um einen Kunststoffaden zwei Drähte gesponnen. Der so entstandene Hütenzaun oder auch Weidezaun wird gleichzeitig durch eine umlaufende Bewegung des Zwirnrings aufgewickelt. Aktuell wird dies durch einen umlaufenden Kunststoffhaken realisiert. Ungewollte Verschmutzung durch die Schmierung des Hakens und dessen starker Verschleiß machen den Einsatz eines magnetgelagerten umlaufenden Hakens sinnvoll. Dieser soll an einen Kreisring befestigt werden in dessen Mitte der Hütenzaun hergestellt wird.

Da ein scheibenförmiger Läufer bei der EAAT GmbH bislang noch nicht magnetisch gelagert wurde, sollen in dieser Arbeit Grundlagenuntersuchungen dazu durchgeführt werden. Dafür ist der Unterschied zwischen der magnetischen Lagerung einer Scheibe und der einer Welle herauszuarbeiten. Weiterhin sollen verschiedene Möglichkeiten der magnetischen Lagerung für das Projekt „Zwirnring“ aufgezeigt werden. Mit Hilfe eines Versuchsmodells soll die praktische Umsetzung der magnetischen Kreisringlagerung realisiert werden.

## II Inhaltsverzeichnis

Bibliographische Beschreibung und Referat .....	III
I Vorwort .....	III
II Inhaltsverzeichnis .....	V
III Abbildungsverzeichnis .....	VII
IV Tabellenverzeichnis .....	IX
V Formel- und Kurzzeichenverzeichnis .....	X
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen des Magnetismus .....	2
2.1 Magnetische Grundgrößen.....	2
2.2 Das Earnshaw-Theorem.....	4
2.3 Magnetwerkstoffe und Arten des Magnetismus .....	4
2.3.1 Diamagnetismus .....	4
2.3.2 Paramagnetismus .....	5
2.3.3 Ferromagnetismus .....	6
2.3.4 Permanentmagnete.....	8
2.3.5 Elektromagnete .....	11
3 Magnetlager.....	13
3.1 Aktive magnetische Lager .....	13
3.1.1 Radiallager.....	16
3.1.1.1 Heteropolarlager.....	16
3.1.1.2 Homopolarlager .....	17
3.1.2 Axiallager .....	17
3.2 Permanentmagnetische Lager.....	18
4 Möglichkeiten der Scheibenlagerung .....	21
4.1 Variante 1 - Axial: aktiv, Radial: passiv .....	21
4.1.1 Axiale Lagerung - aktiv.....	21
4.1.1.1 Magnetischer Kreis .....	22
4.1.1.2 Berechnung der Wicklungen.....	25
4.1.2 Radiale Lagerung - passiv.....	27
4.2 Variante 2 - Axial: passiv, Radial: aktiv .....	32
4.3 Variante 3 - Axial: aktiv, Radial: aktiv.....	33
5 Unterschiede zwischen Welle und Scheibe.....	35
5.1 Das Massenträgheitsmoment.....	35
5.2 Das Flächenträgheitsmoment.....	37
5.3 Wellen- / Scheibenrotordynamik.....	38

---

5.4	Unterschiede in der Lagerung .....	41
6	Das Versuchsmodell .....	44
6.1	Die Grund- und Deckplatte des Modells .....	44
6.2	Die Wirbelstromsensoren mit Halterung .....	45
6.3	Die Elektromagnete .....	46
7	Inbetriebnahme und Ergebnisse .....	48
7.1	Die Park-Transformation .....	51
8	Zusammenfassung und Ausblick .....	57
	Literaturverzeichnis .....	59
	Anhang .....	62
	Selbständigkeitserklärung .....	81

### III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Diamagnetischer Werkstoff im magnetischen Feld.....	5
Abbildung 2 - Paramagnetischer Werkstoff im magnetischen Feld.....	6
Abbildung 3 - Ferromagnetischer Werkstoff im magnetischen Feld.....	7
Abbildung 4 - Die Weiss'schen Bezirke bei einem NdFeB-Schnitt /5/.....	7
Abbildung 5 - Vergrößerung der Weiß'schen Bezirke.....	8
Abbildung 6 - Hysteresekurve eines hart- (links) und weichmagnetischen (rechts) Werkstoffes .....	9
Abbildung 7 - B(H)-Kennlinie permanentmagnetischer Materialien .....	10
Abbildung 8 - Funktionsprinzip eines aktiven Magnetlagers .....	13
Abbildung 9 - Radiallager mit Grunderreger- und Steuererregerwicklung /1/.....	14
Abbildung 10 - Vergleich Wirbelstrom im Eisenstück (links) und im Blechpaket (rechts) /10/15	
Abbildung 11 - 8-poliges Heteropolarlager mit NNSS-Anordnung (links) und NSNS- Anordnung (rechts).....	16
Abbildung 12 - Prinzip eines Homopolarlagers.....	17
Abbildung 13 - Aktives Axiallager.....	18
Abbildung 14 - attraktiv (links) und repulsiv (rechts) angeordnete Magnetsegmente .....	19
Abbildung 15 - Übersicht aktives Axiallager .....	22
Abbildung 16 - Ersatzschaltbild des magnetischen Kreis und Flussbild .....	22
Abbildung 17 - vereinfachtes Ersatzschaltbild .....	23
Abbildung 18 - Mittlere Eisenlängen.....	25
Abbildung 19 - Möglichkeiten der Drahtanordnungen.....	26
Abbildung 20 - Abhängigkeit der Anzahl der Lagen für die Grunderregung.....	26
Abbildung 21 - Abhängigkeit der Anzahl der Lagen für die Steuererregerwicklung .....	27
Abbildung 22 - Randlinien eines Multiringlagers.....	29
Abbildung 23 - Simulation des Radiallagers.....	30
Abbildung 24 - Radiallager - Verschiebung in X-Richtung um 0,3mm .....	30
Abbildung 25 - Vergleich Simulation mit Berechnung.....	31
Abbildung 26 - Anordnung Radiallagerstellen mit wirksamen und unwirksamen Kanten .....	31
Abbildung 27 - Variante 2 - Axial: passiv, Radial: aktiv.....	32
Abbildung 28 - Variante 3 - Axial: aktiv, Radial: aktiv .....	34
Abbildung 29 - Koordinatensysteme für das Trägheitsmoment .....	35
Abbildung 30 - Zylinder in Koordinatensystem .....	36
Abbildung 31 – Biegeeigenschwingungen einer Welle bei verschiedenen Drehzahlen /19/ .	39
Abbildung 32 - Chladnische Klangfiguren; .....	40
Abbildung 33 - einfaches Radiallager.....	41

Abbildung 34 - Magnetgelagerte Welle /1/ .....	41
Abbildung 35 - Varianten der Radiallager.....	42
Abbildung 36 - Möglichkeiten der axialen Lagerung .....	42
Abbildung 37 - Die Grundplatte .....	44
Abbildung 38 - Messprinzip Wirbelstromsensor /23/ .....	45
Abbildung 39 - Die Halterung mit Wirbelstromsensor .....	46
Abbildung 40 - Elektromagnet.....	46
Abbildung 41 - Das Funktionsmodell.....	47
Abbildung 42 - Simulation mit Messspurring .....	48
Abbildung 43 - Grundplatte mit versetzten Sensoren .....	49
Abbildung 44 - Verkippung des Kreisringes .....	49
Abbildung 45 - Optimale Messposition.....	50
Abbildung 46 - Koordinatensystem der Park-Transformation .....	51
Abbildung 47 - Messsignal-Koordinaten-Beziehung.....	52
Abbildung 48 - Drehung um die X-Achse (links) und um die Y-Achse (rechts) .....	53
Abbildung 49 - Messsignal-Koordinaten-Beziehung mit versetzten Sensoren.....	55

## **IV Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1 - Eigenschaften ausgewählter hartmagnetischer Materialien .....	11
Tabelle 2 - Tabelle zur Berechnung permanentmagnetischer Ringlager /16/ .....	29

## V Formel- und Kurzzeichenverzeichnis

Formel- / Kurzzeichen	Beschreibung	Einheit
$A$	Fläche allgemein	$[m^2]$
$A_L$	Anzahl der Lagen einer Spule	1
$A_\delta$	Luftspaltfläche	$[m^2]$
$A_{\delta\gamma}$	Luftspaltfläche mit Eisenfüllfaktor	$[m^2]$
$B$	Polbreite	$[m]$
$B$	magnetische Flussdichte allgemein	$\left[T = \frac{kg}{A \cdot s^2}\right]$
$B_r$	Remanenzflussdichte	$\left[T = \frac{kg}{A \cdot s^2}\right]$
$B_\delta$	Luftspaltinduktion	$\left[T = \frac{kg}{A \cdot s^2}\right]$
$(BH)_{max}$	maximales magnetisches Energieprodukt	$\left[MGOe = \frac{J}{m^3}\right]$
$d_D$	Drahtdurchmesser allgemein	$[m]$
$d_{D,G}$	Drahtdurchmesser Grunderregung	$[m]$
$d_{D,St}$	Drahtdurchmesser Steuererregewicklung	$[m]$
$d_{Sp}$	Spulenbreite	$[m]$
$F$	Kraft allgemein	$\left[N = \frac{kg \cdot m}{s^2}\right]$
$F_{Pol}$	Kraft pro Pol	$\left[N = \frac{kg \cdot m}{s^2}\right]$
$F_X$	Kraft in X-Richtung	$\left[N = \frac{kg \cdot m}{s^2}\right]$
$H$	magnetische Feldstärke allgemein	$\left[\frac{A}{m} = \frac{kg \cdot m}{s^3 \cdot A}\right]$
$H_c$	Koerzitivfeldstärke	$\left[\frac{A}{m} = \frac{kg \cdot m}{s^3 \cdot A}\right]$

Formel- / Kurzzeichen	Beschreibung	Einheit
$H_{\delta}$	magnetische Feldstärke im Luftspalt	$\left[ \frac{A}{m} = \frac{kg \cdot m}{s^3 \cdot A} \right]$
$h_{Sp}$	Spulenhöhe	$[m]$
$I$	Flächenträgheitsmoment allgemein	$[m^4]$
$I_P$	polares Flächenträgheitsmoment	$[m^4]$
$I_X$	axiales Flächenträgheitsmoment X-Richtung	$[m^4]$
$I_Z$	axiales Flächenträgheitsmoment Z-Richtung	$[m^4]$
$I$	Strom allgemein	$[A]$
$i_0$	Grunderregerstrom	$[A]$
$i_x$	Steuerstrom	$[A]$
$J$	Massenträgheitsmoment	$[kg \cdot m^2]$
$J_{Z,Scheibe}$	Massenträgheitsmoment einer Scheibe	$[kg \cdot m^2]$
$J_{Z,Welle}$	Massenträgheitsmoment für eine Welle	$[kg \cdot m^2]$
$l_{Fe}$	mittlere Eisenlänge allgemein	$[m]$
$l_{Fe,Rücken}$	mittlere Eisenlänge Statorrücken	$[m]$
$l_{Fe,Zahn}$	mittlere Eisenlänge Statorzahn	$[m]$
$l_{Sp}$	Länge der Spule	$[m]$
$M$	Masse	$[kg]$
$N$	Windungszahl	1
$n_{krit}$	biegekritische Drehzahl	$[min^{-1}]$
$p_{mag}$	magnetischer Lagerdruck	$\left[ \frac{N}{m} \right]$
$p_{ref}$	Referenzdruck	$\left[ \frac{N}{m^2} \right]$
$R$	Radius	$[m]$



Formel- / Kurzzeichen	Beschreibung	Einheit
$R_{Rückem}$	Eisenwiderstand vom Statorrücken	$\left[ \frac{A}{V \cdot s} \right]$
$R_{Rotor}$	Eisenwiderstand vom Rotor	$\left[ \frac{A}{V \cdot s} \right]$
$R_{Zahn}$	Eisenwiderstand vom Statorzahn	$\left[ \frac{A}{V \cdot s} \right]$
$R_{\delta}$	Eisenwiderstand vom Luftspalt	$\left[ \frac{A}{V \cdot s} \right]$
$R_{\sigma}$	Eisenwiderstand der Streuung	$\left[ \frac{A}{V \cdot s} \right]$
$s_{ax}$	axiale Steifigkeit	$\left[ \frac{N}{m} \right]$
$s_{rad}$	radiale Steifigkeit	$\left[ \frac{N}{m} \right]$
$s_{ref}$	Referenzsteifigkeit	$\left[ \frac{N}{m} \right]$
$s_X$	Verschiebung in X-Richtung	$[m]$
$T_C$	Curie-Temperatur	$[^{\circ}C]$
$U_m$	magnetische Urspannung	$[A]$
$V$	Volumen	$[m^3]$
$V_{\delta}$	magnetische Spannung im Luftspalt	$[A]$
$W$	Lagerspaltweite	$[m]$
$\Gamma$	Eisenfüllfaktor	1
$\Delta$	Luftspalt	$[m]$
$\Theta$	Durchflutung	$[A]$
$l$	Randlänge der Permanentmagneten	$[m]$
$\mu$	magnetischer Leitwert	$\left[ H = \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2} \right]$

Formel- / Kurzzeichen	Beschreibung	Einheit
$M$	magnetische Permeabilität	$\left[ \frac{V \cdot s}{A \cdot m} \right]$
$\mu_0$	magnetische Feldkonstante	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{V \cdot s}{A \cdot m} \right]$
$\mu_r$	relative Permeabilität	1
$\Sigma$	Streufaktor	1
$\Phi$	magnetischer Fluss allgemein	$[Wb = V \cdot s]$
$\Phi_{Rücken}$	magnetischer Fluss im Statorrücken	$[Wb = V \cdot s]$
$\Phi_{Rotor}$	magnetischer Fluss im Rotor	$[Wb = V \cdot s]$
$\Phi_{Zahn}$	magnetischer Fluss im Statorzahn	$[Wb = V \cdot s]$
$\Phi_\delta$	magnetischer Fluss im Luftspalt	$[Wb = V \cdot s]$
$\Phi_\sigma$	Streufuss	$[Wb = V \cdot s]$
$\Omega$	Eigenkreisfrequenz	$\left[ Hz = \frac{1}{s} = 2 \cdot \pi \cdot f \right]$
$\Omega$	Drehgeschwindigkeit	$\left[ Hz = \frac{1}{s} = 2 \cdot \pi \cdot f \right]$
$\Omega_r$	Resonanzdrehzahl	$\left[ Hz = \frac{1}{s} = 2 \cdot \pi \cdot f \right]$
$\Phi$	magnetischer Fluss	$[Wb = V \cdot s]$
AlNiCo	Legierung aus Aluminium, Nickel und Kobalt	
bzw.	beziehungsweise	
ESB	Ersatzschaltbild	
evtl.	eventuell	
FEM	Finite Elemente Methode	
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor	
OPV	Operationsverstärker	
SmCo	Legierung aus Samarium und Kobalt	
z.B.	zum Beispiel	

# 1 Einleitung

Da in den verschiedenen Industriezweigen der Trend zu immer höheren Drehzahlen geht, werden immer häufiger Magnetlager eingesetzt. Gewöhnliche Gleit- und Wälzlager sind diesen Anforderungen nicht mehr gewachsen: so reißt bei Gleitlagern bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten der Schmierfilm ab und bei Wälzlagern treten unzulässig hohe Pressungen der Wälzkörper auf. Trotz der Bemühungen der Hersteller neue Schmiermittel und Werkstoffe zu verwenden, gab es noch keinen Durchbruch hinsichtlich einer ausreichenden Lebensdauer. /1/ S. 3 /2/

Unabhängig von Schmiermitteln und Wälzkörpern sind hingegen die Magnetlager. Sie arbeiten berührungslos und sind damit verschleißfrei. Dieser entscheidende Vorteil ist es, welcher Magnetlager für Anwendungen im Vakuum und im Rein- oder Reinraum auszeichnet. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Achsenposition während des Betriebs veränderlich ist und dadurch lassen sich z.B. elliptische Bewegungen der Welle realisieren. Aufgrund der berührungslosen Lagerung gibt es keine Reibungsverluste im Lager, was die Effizienz eines Antriebs steigern kann. Da Magnetlager nicht gänzlich frei von Verlusten sind, können solche z.B. durch die Ummagnetisierung im Stator und im Rotor auftreten. Schaltverluste im Umrichter und Kupferverluste in den Wicklungen der Elektromagneten sind ebenfalls zu berücksichtigen. /3/ S. 2

Die magnetische Lagerung von Wellen ist einer der Entwicklungsschwerpunkte bei der EAAT und wurde schon mehrfach erfolgreich eingesetzt. Die magnetische Lagerung einer Scheibe, bzw. eines Ringes stellt das Unternehmen vor eine neue Herausforderung.

In dieser Arbeit wird zunächst auf die Wirkungsweise eines Magnetlagers eingegangen und die unterschiedlichen Formen vorgestellt. Im Weiteren wird auf den Unterschied zwischen der Lagerung einer Welle und der einer Scheibe bzw. der eines Kreisringes eingegangen. Letztendlich soll für die praktische Umsetzung der magnetischen Lagerung eines scheibenförmigen Läufers ein Modell dimensioniert und untersucht werden.

## 2 Grundlagen des Magnetismus

In dem folgenden Abschnitt soll ein Überblick der magnetischen Grundgrößen und der damit verbundenen Zusammenhänge untereinander geschaffen werden. Ergänzend wird auf das Earnshaw-Theorem und auf ausgewählte Arten des Magnetismus eingegangen.

### 2.1 Magnetische Grundgrößen

#### Durchflutung $\Theta$

Um einen stromdurchflossenen Leiter bildet sich durch Elektronenbewegung ein Magnetfeld aus. Liegen wie bei einer Spule mehrere Leiter nebeneinander, steigt die magnetische Durchflutung mit der Anzahl der Windungen  $N$ . Die Summe der Ströme  $I$  durch die Leiter wird magnetische Durchflutung genannt. Diese Durchflutung ist für das magnetische Feld verantwortlich und wird auch magnetische Urspannung  $U_m$  genannt. /4/

$$\Theta = \sum_{i=0}^n i_i \quad [A] \quad (1)$$

$$\Theta = I \cdot N \quad (2)$$

#### Magnetische Permeabilität $\mu$

Die magnetische Permeabilität  $\mu$  gibt die Durchlässigkeit von Materialien für magnetische Felder an und charakterisiert die Wechselwirkung eines Stoffes mit dem magnetischen Feld. Sie ist ein Zahlenwert, der den Verstärkungsfaktor der magnetischen Flussdichte  $\Phi$  gegenüber dem Vakuum angibt. Die magnetische Permeabilität ist das Produkt aus der magnetischen Feldkonstante  $\mu_0$  und der materialabhängigen Permeabilitätszahl  $\mu_r$ . Sie beträgt im Vakuum genau 1 und in einem Supraleiter 0. Bei diamagnetischen Stoffen ist  $\mu_r < 1$ . In ihrem Inneren wird das Magnetfeld geschwächt. Bei paramagnetischen Stoffen ist  $\mu_r > 1$ . In ihrem Inneren wird das Magnetfeld verstärkt. Bei Ferromagnetischen Stoffen ist  $\mu_r \gg 1$ . Sie konzentrieren das Magnetfeld in ihrem Inneren besonders stark. Zu verdeutlichen ist der Einfluss der Permeabilität auf den magnetischen Fluss am einfachsten mit dem magnetischen Leitwert  $\mathcal{A}$ , siehe (5). Dabei ist  $l_{Sp}$  die Länge der Spule und  $A$  die Querschnittsfläche. /5/

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \approx 1,2566 \cdot 10^{-6} \quad \left[ \frac{V \cdot s}{A \cdot m} \right] \quad (3)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (4)$$

$$A = \frac{\Phi}{\Theta} = \frac{\mu \cdot H \cdot A}{I \cdot N} = \frac{\mu \cdot A}{l_{Sp}} \quad [H] \quad (5)$$

### Magnetischer Fluss $\Phi$

Das gesamte magnetische Feld einer Spule wird magnetischer Fluss genannt. Im Modell des Magnetfelds kann man sich darunter die Gesamtzahl der magnetischen Feldlinien vorstellen. Je größer der magnetische Fluss ist, desto größer ist die magnetische Wirkung eines Elektromagneten. Der magnetische Fluss ergibt sich aus dem Produkt der Flussdichte  $B$  und der von ihr senkrecht durchsetzten Fläche  $A$ . /4/

$$\Phi = \int_A B \cdot dA \quad [V \cdot s] \quad (6)$$

$$\Phi = B \cdot A_{\perp} \quad [V \cdot s] \quad (7)$$

### Magnetische Flussdichte $B$

Die magnetische Flussdichte wird aus dem magnetischem Fluss  $\Phi$  und der von ihm senkrecht durchsetzten Fläche  $A$  gebildet. Damit spiegelt die magnetische Flussdichte die Dichte des magnetischen Flusses wieder. /4/

$$B = \frac{\Phi}{A_{\perp}} \quad \left[ \frac{V \cdot s}{m^2} \right] = [T] \quad (8)$$

$$B = \mu \cdot H \quad (9)$$

### Magnetische Feldstärke $H$

Die magnetische Durchflutung führt in einer Spule zu einem Magnetfeld. Die Feldstärke ist eine vektorielle Größe, welche jedem Raumpunkt die Stärke und Richtung des magnetischen Feldes zuordnet. Bei einer Spule ist die Feldstärke abhängig vom Erregerstrom  $I$ , der Windungszahl  $N$  und der Länge des Leiters  $l_{Sp}$ . Die magnetische Feldstärke beschreibt die magnetische Durchflutung pro Spulenlänge. /4/

$$H = \frac{N \cdot I}{l_{Sp}} \quad [V \cdot s] \quad (10)$$

$$H = \frac{\Theta}{l_{Sp}} \quad (11)$$

## 2.2 Das Earnshaw-Theorem

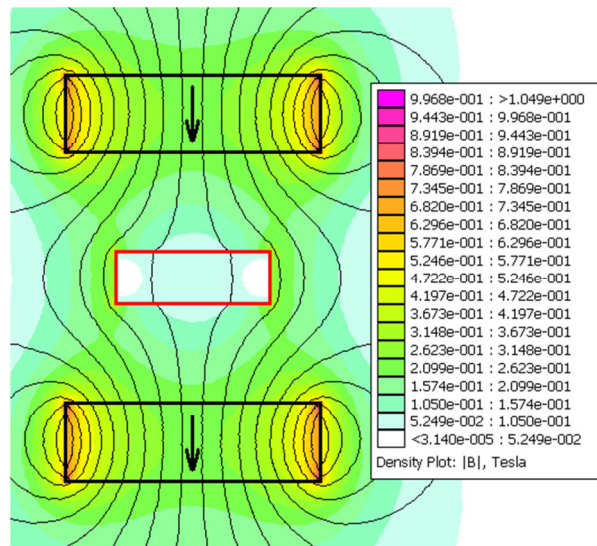
Der Physiker Samuel Earnshaw fasste die ampère'schen Gesetze, das Induktionsgesetz von Faraday sowie die Gesetze von Gauß zusammen und ergänzte sie um den maxwell'schen Verschiebungsstrom. Dabei entstand 1842 das nach ihm benannte Earnshaw-Theorem. Es besagt, dass statische Magnetfelder nicht in der Lage sind Objekte in einem stabilen Gleichgewicht zu halten. Das bedeutet, dass es nicht möglich ist eine Konstruktion nur mit Dauermagneten stabil zu lagern. Für eine stabile magnetische Lagerung werden entweder diamagnetische Materialien oder aktiv geregelte, dynamische Felder benötigt. /6/

## 2.3 Magnetwerkstoffe und Arten des Magnetismus

In den folgenden Abschnitten soll ein Überblick über ausgewählte Arten von Magnetwerkstoffen und Formen des Magnetismus geschaffen werden.

### 2.3.1 Diamagnetismus

Diamagnetische Stoffe, wie z.B. Blei, Wismut und Graphit, besitzen eine relative Permeabilität  $\mu$ , welche größer als Null aber kleiner als Eins ist. Sie werden von Magnetfeldern abgestoßen und dabei ist es egal, ob sie einem Nord- oder einem Südpol angenähert werden. Dieser Effekt beruht auf der Tatsache, dass diamagnetische Stoffe einen geringeren magnetischen Fluss aufnehmen können als deren Umgebung (meist Luft) und somit aus dem magnetischen Feld heraus gedrängt werden. In Abbildung 1 wird diese Eigenschaft eines diamagnetischen Materials mit einem Programm der Finiten-Elemente-Methode (im Folgenden FEM-Programm) simuliert. Alle Magnetfeldsimulationen in dieser Arbeit wurden mit dem FEM-Programm FEMM 4.2 von Ph.D. David Meeker erzeugt.



**Abbildung 1 - Diamagnetischer Werkstoff im magnetischen Feld**

Die schwarz umrahmten Magnetwerkstoffe bilden ein magnetisches Feld aus. Die Pfeile im Inneren der Magnete zeigen in die Richtung des magnetischen Nordpols. Die dünnen schwarzen Linien symbolisieren die magnetischen Feldlinien und damit den magnetischen Fluss, dessen Dichte farbig dargestellt ist. Hellblau und Grün entsprechen einer geringen Flussdichte und Orange sowie Violett stellen einen höheren Fluss dar. Der rot umrandete diamagnetische Werkstoff befindet sich mittig zwischen den Permanentmagneten. Begründet ist der Diamagnetismus durch die um den Atomkern kreisenden Elektronen. Das Kreisen der Elektronen stellt eine Bewegung von Elementarladungen und damit einen Stromfluss dar, was wiederum ein magnetisches Feld hervorruft. Die Besonderheit bei diamagnetischen Stoffen ist, dass sich die so entstehenden magnetischen Momente nach außen hin aufheben. Wird der Diamagnet einem äußeren Magnetfeld ausgesetzt, werden Ströme auf atomarer Ebene induziert, welche wiederum ein Magnetfeld hervorrufen. Dieses Magnetfeld wirkt dem bereits vorhandenen magnetischen Moment entgegen und der magnetische Fluss im Inneren wird geschwächt. Die Verdrängung des magnetischen Flusses ist in Abbildung 1 deutlich zu erkennen. /7/, /5/ S. 30 und S. 102ff

### 2.3.2 Paramagnetismus

Viele Werkstoffe haben eine relative Permeabilität  $\mu_r$  von Eins bzw. minimal größer als Eins und sind deshalb paramagnetisch. Diese Stoffe setzen einem eindringenden Magnetfeld keinen Widerstand entgegen. Dies begründet sich durch die unsymmetrisch besetzten Elektronenschalen der Atome und dem dadurch hervorgerufenen magnetischem Moment. Wird an einem paramagnetischen Material ein Magnetfeld angelegt, richten sich die Elementarmagnete in seinem Inneren einheitlich aus. Die Magnetisierung des paramagnetischen Stoff-

es verhält sich proportional zu dem angelegten Magnetfeld. Wird das äußere Magnetfeld entfernt, verschwindet die Ausrichtung der Elementarmagnete. In Abbildung 2 ist ein paramagnetischer Werkstoff in einem magnetischen Feld simuliert worden. Eine Beeinflussung des Magnetfeldes durch dieses Werkstück ist nicht zu erkennen, da sich die Elementarmagnete in seinem Inneren einheitlich ausgerichtet haben und somit dem Magnetfeld nicht entgegenwirken. /11/ S. 8

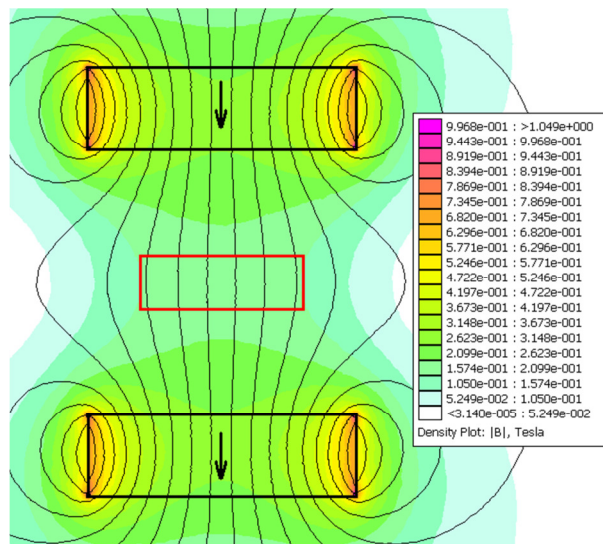
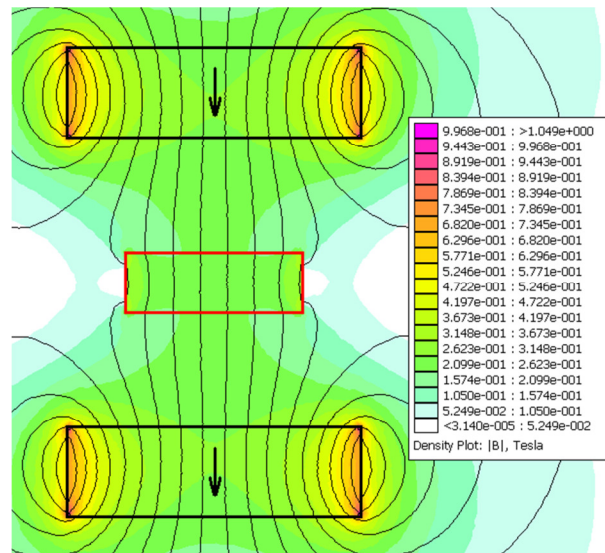


Abbildung 2 - Paramagnetischer Werkstoff im magnetischen Feld

### 2.3.3 Ferromagnetismus

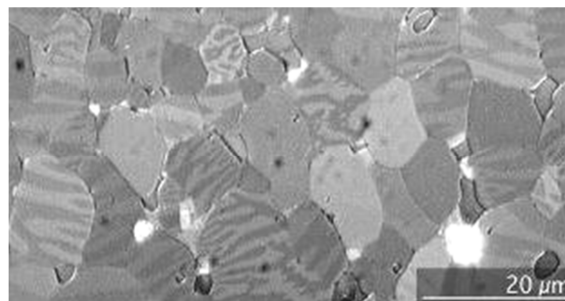
Die Abbildung 3 veranschaulicht die Simulation eines ferromagnetischen Körpers in einem magnetischen Feld, welches von Luft umgeben ist. Im Vergleich zu der Simulation des diamagnetischen (Abbildung 1) bzw. des paramagnetischen (Abbildung 2) Stoffes ist eine hohe magnetische Flussdichte (Grünfärbung) im Inneren des ferromagnetischen Stoffes zu erkennen. Zudem weist er eine vielfach höhere magnetische Induktion, bzw. Flussdichte bei gleicher Feldstärke auf.





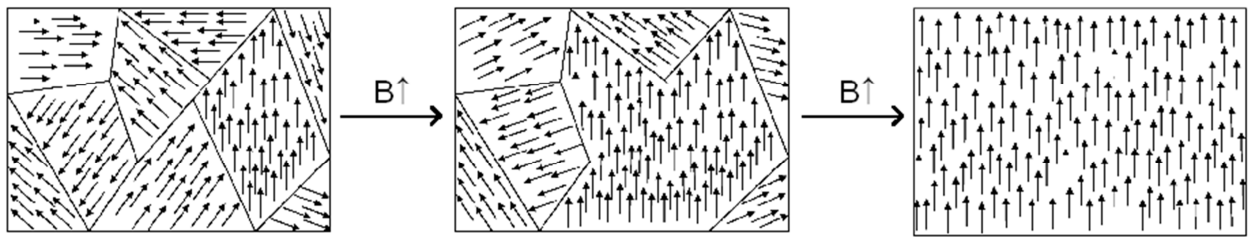
**Abbildung 3 - Ferromagnetischer Werkstoff im magnetischen Feld**

Dieser Effekt ist auf die Bildung von Weiß'schen Bezirken nach dem französischen Physiker Pierre-Ernest Weiß zurückzuführen. Ein solcher Bezirk, auch Domäne, ist ein Bereich in dem die magnetischen Momente parallel ausgerichtet sind. An den Grenzen der Domäne ändert sich die magnetische Ausrichtung der Momente. Bei starker Vergrößerung eines Neodym-Eisen-Bohr-Schnittes sind die Weiß'schen Bezirke durch die unterschiedliche hell- / dunkel-Färbung in Abbildung 4 gut zu erkennen.



**Abbildung 4 - Die Weiss'schen Bezirke bei einem NdFeB-Schnitt /5/**

Die Grenzen zwischen den verschiedenartig gerichteten Domänen nennt man Bloch-Wände, welche nach dem schweizerisch-amerikanischen Physiker Felix Bloch benannt sind. An ihnen ändert sich die Richtung der Magnetisierung fließend. Die Drehung erfolgt so, dass die Magnetisierung stets parallel zur Wandfläche steht. Wird um einen ferromagnetischen Körper ein Magnetfeld erzeugt, breiten sich die Weiß'schen Bezirke, welche bereits in Richtung des Magnetfelds orientiert sind, aus. Mit zunehmender Verstärkung des äußeren Felds ändern immer mehr Bezirke spontan ihre Polung. Dieser Vorgang wird als Barkhausen-Sprung oder dem Barkhausen-Effekt bezeichnet. In Abbildung 5 ist dieser Effekt schematisch dargestellt.

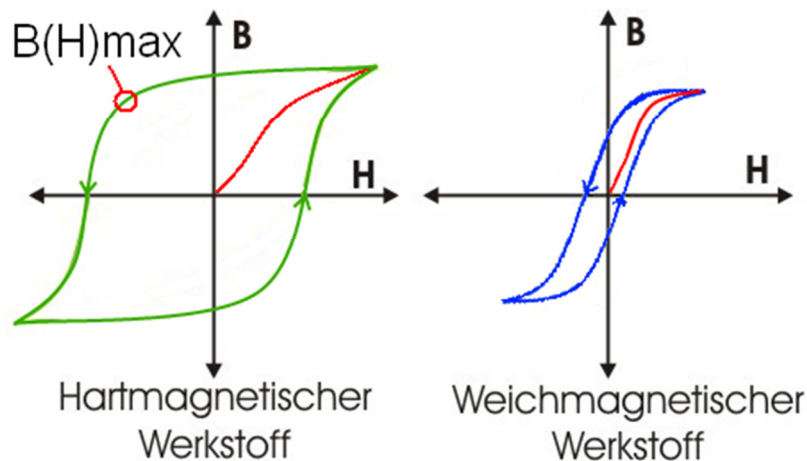


**Abbildung 5 - Vergrößerung der Weiß'schen Bezirke**

Die Drehung der Bezirke geschieht so lang, bis alle Domänen gleichgerichtet sind. Eine Erhöhung des Magnetfelds hat keine weitere Auswirkung auf die Ausrichtung der Weiß'schen Bezirke. In diesem Fall wird von der magnetischen Sättigung des Materials gesprochen. Abhängig von der Stärke des angelegten Magnetfelds ist ein Teil dieser Vorgänge nicht mehr umkehrbar. So bleiben mehrere Domänen gleichgerichtet und es bleibt eine Restmagnetisierung des Materials bestehen. Diese Eigenschaft ist die Grundvoraussetzung für die Herstellung von Permanentmagneten. /7/ , /8/ S. 271ff

### 2.3.4 Permanentmagnete

Wird an einen ferromagnetischen Werkstoff ein starkes äußeres Magnetfeld angelegt und dieses wieder entfernt, bleibt ein Restmagnetismus vorhanden. Die Ursache dafür ist der Barkhausen-Sprung, welcher in 2.3.3 beschrieben wurde. Die Intensität der verbleibenden Flussdichte ist abhängig von der Stärke des angelegten Magnetfeldes sowie von der Art des Stoffes. Bei Metallen wird zwischen hartmagnetischen und weichmagnetischen Werkstoffen unterschieden. Weichmagnetische Stoffe, wie z.B. Eisen und Ferrite, haben eine schmale Hysteresekurve und sind schlecht dauerhaft magnetisierbar. Aus diesem Grund werden sie häufig als Motor- und Generatorbleche sowie für Relais eingesetzt. Bei diesen Anwendungen ist eine dauerhafte Magnetisierung unerwünscht. Hartmagnetische Werkstoffe hingegen besitzen eine breite Hysteresekurve, welche durch eine hohe Remanenzflussdichte  $B_r$  bedingt ist. Diese gibt Auskunft darüber, wie groß die magnetische Flussdichte nach dem Entfernen des äußeren Magnetfelds ist. In Abbildung 6 sind die Hysteresekurven von hart- und weichmagnetischen Werkstoffen dargestellt.



**Abbildung 6 - Hysteresekurve eines hart- (links) und weichmagnetischen (rechts) Werkstoffes**

Diese Hysteresekurven stellen die Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte  $B$  von der magnetischen Feldstärke  $H$  dar. Wenn ein ferromagnetisches Material zum ersten Mal magnetisiert wird, folgt die Flussdichte mit einem steigenden magnetischen Feld der Neukurve. In Abbildung 6 ist diese Neukurve rot dargestellt. Die Flussdichte steigt nur bis zu der maximalen Sättigungsdichte an und danach nicht weiter. Für Vergleichszwecke von Permanentmagneten wird oft das maximale Energieprodukt  $(BH)_{max}$  herangezogen. Das magnetische Energieprodukt ist ein Maß für die Energie, welche in einem Magneten gespeichert ist. Diese Energie entsteht durch die gleichgerichteten Momente im Inneren des Magneten. Je größer das Energieprodukt ist, desto größer ist auch die magnetische Kraft eines Magneten. Das maximale magnetische Energieprodukt entspricht dem Punkt auf der Entmagnetisierungskurve (2. Quadrant der Hysteresekurve) an dem das Produkt aus der magnetischen Feldstärke  $H$  und der Magnetischen Flussdichte  $B$  ein Maximum aufweist, siehe (12) und Abbildung 6.

$$(BH)_{max} = B \cdot H \quad \left[ \frac{J}{m^3} ; MGOe \right] \quad (12)$$

Das maximale Energieprodukt wird in der Dimension Energie  $J$  pro Volumen  $m^3$  oder in Megagauß-Oersted  $MGOe$  angegeben. Oberhalb der materialspezifischen Curie-Temperatur  $T_C$ , welche nach dem französischen Physiker und Entdecker Pierre Curie benannt wurde, weisen sie nur noch paramagnetische Eigenschaften auf. Wird die Curie-Temperatur wieder unterschritten, findet eine spontane und selbstständige Magnetisierung der Weiß'schen Bezirke statt. Die Werkstoffe erhalten ihre magnetischen Eigenschaften zurück. Nachfolgend soll ein Überblick über die wichtigsten industriell und kommerziell genutzten dauermagnetischen Materialien gegeben werden.

Ferrite bestehen aus Eisenoxid und Strontium/Barium Carbonat. Sie werden durch das Pressen und anschließendes Sintern hergestellt. Somit lassen sich mit ihnen auch komplizierte Formen produzieren. Ferritmagnete weisen eine hohe thermische Stabilität auf und sind unempfindlich gegenüber anderen Feldern. Weiterhin sind Ferrite chemisch sehr stabil und so können Langzeitänderungen der magnetischen Induktion nahezu ausgeschlossen werden. Diese Eigenschaften und der niedrige Preis, machen Ferrite zu den populärsten dauermagnetischen Materialien. Vor allem in der Automobil- und Elektroindustrie wird deren hohe magnetische Stabilität geschätzt. Die  $B(H)$ -Kennlinie der Ferritmagneten weist eine ausgeprägte Rechteckform auf, was auf eine hohe Stabilität in diesem Bereich hindeutet. In Abbildung 7 sind die Kennlinien der hier beschriebenen permanentmagnetischen Materialien dargestellt. Die geringe Koerzitivfeldstärke  $H_c$  führt dazu, dass das Material sehr leicht magnetisiert werden kann. Dies macht es möglich, sehr kleine und komplizierte Polstrukturen auf der Magnetoberfläche zu erzeugen.

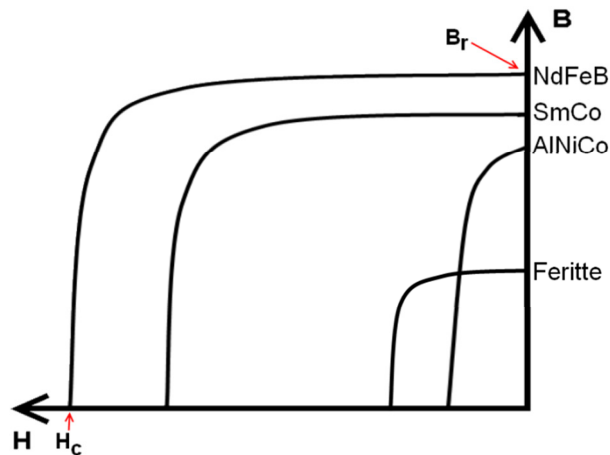


Abbildung 7 -  $B(H)$ -Kennlinie permanentmagnetischer Materialien

Das historisch erste permanentmagnetische Material für die Massenproduktion war eine Legierung aus Aluminium, Nickel und Kobalt (AlNiCo). Diese Legierung verliert aber immer mehr an Bedeutung, weil deren Stabilität gegenüber äußeren Feldern nicht ausreichend gegeben ist. Begründet ist diese Abhängigkeit durch die gebogene Magnetisierungskurve, siehe Abbildung 7. Die AlNiCo-Magnete weisen dabei von allen hier aufgeführten Magnetmaterialien den geringsten Temperaturkoeffizient der Remanenzflussdichte auf. Das führt zu einer sehr geringen Änderung der Flussdichte im Alterungsprozess. Durch die Gusstechnik können AlNiCo-Magnete mittels geringer Kosten in komplizierte Formen gebracht werden. Deren hoher Widerstand gegen Korrosion und deren Kompatibilität zu den meisten Beschichtungsverfahren machen das Material nach wie vor bei der Herstellung von Messinstrumenten interessant.

Für sehr starke permanentmagnetische Felder werden Magneten aus Seltenerd basierenden Materialien hergestellt, wie z.B. Samarium Kobalt (SmCo) oder Neodym Eisen Bohr (NdFeB). Durch ihre hohe Koerzitivfeldstärke ergibt sich eine rechteckige B(H)-Kennlinie. Dies weist auf eine hohe magnetische Stabilität der Seltenerd-Magnete in Bezug auf magnetische Verluste hin. Die SmCo-Magnete besitzen eine ca. 14mal so hohe Koerzitivfeldstärke wie AlNiCo-Magnete und die NdFeB-Magnete sogar eine 17mal höhere. Nachteilig an NdFeB-Magneten ist, dass sie zu Korrosion und Oxidation neigen. Das führt dazu, dass sie einen Teil ihres magnetischen Flusses verlieren. In Folge dessen ist es notwendig die Magnete aufwändig mit Metall oder Kunststoff zu beschichten. SmCo besitzt ähnliche Eigenschaften wie NdFeB, wobei einzig dessen hoher sein Preis als nachteilig gesehen werden kann. Vorteilhaft ist, dass die SmCo-Magnete bis zu einer Temperatur von ca. 250°C eingesetzt werden können. AlNiCo-Magnete können nur bis zu einer Temperatur von ca. 180°C verwendet werden. Der hohe Anteil an Kobalt macht den Magnetwerkstoff SmCo zwar beständig gegen Korrosion und Oxidation, aber eben auch teuer. /8/ S. 277 – 288, /9/

In der Tabelle 1 sind die Eigenschaften der eben beschrieben Magnetwerkstoffe noch einmal kurz zusammengefasst.

Material	Remanenzflussdichte	Magnetische Stabilität	Chemische Stabilität	Kosten	Einsatzgebiet
Ferrit	niedrig $B_r=0,45\text{T}$	mittel $H_C=240\text{kA/m}$	exzellent	sehr gering	hoch qualitative Sensoren
AlNiCo	mittel bis hoch $B_r=1\text{T}$	niedrig $H_C=80\text{kA/m}$	Gut	moderat bis hoch	Messgeräte, Sensoren
NdFeB	sehr hoch $B_r=1,4\text{T}$	exzellent $H_C=1600\text{kA/m}$	korrosionsanfällig	Hoch	permanentmagnetische Motoren
SmCo	Hoch $B_r=1,2\text{T}$	exzellent $H_C=900\text{kA/m}$	Gut	sehr hoch	permanentmagnetische Motoren, Messgeräte, Sensoren

**Tabelle 1 - Eigenschaften ausgewählter hartmagnetischer Materialien**

### 2.3.5 Elektromagnete

Schon im Jahr 1820 erkannte der dänische Physiker Hans Christian Oersted, dass eine Kompassnadel von einem stromdurchflossenen Leiter beeinflusst wird. Jeder stromdurchflossene Leiter bildet um sich herum ein Magnetfeld aus. Dieses ringförmige Magnetfeld baut sich senkrecht zu der Stromflussrichtung auf aufgebaut. Die Richtung der magnetischen Flussdichte kann mit Hilfe der „Rechte-Hand-Regel“ bestimmt werden. Dabei zeigt der Dau-

men der rechten Hand in die Richtung des Stromflusses und die gekrümmten Finger in die Richtung des Magnetflusses. Somit stellt selbst eine einfache Leiterschleife schon einen Elektromagneten dar. Um ein starkes Magnetfeld zu erzeugen, müsste nach (11) ein sehr hoher Strom fließen. Wird die Anzahl der Windungen verdoppelt, wird nur noch der halbe Strom benötigt und so weiter. Zusätzlich kann die Stärke eines Elektromagneten bedeutend erhöht werden, indem das Innere der Wicklungen mit einem ferromagnetischen Material gefüllt wird. Dadurch kippen die Weiß'schen Bezirke um und das magnetische Feld wird erheblich erhöht. Das magnetische Feld wird gebündelt und damit die Streuung reduziert. Das Magnetfeld bleibt solange erhalten, wie elektrische Energie zugeführt wird. Folglich ist der Elektromagnetismus anders als der Permanentmagnetismus von der äußeren Energie abhängig. Das bietet den Vorteil, dass die magnetischen Eigenschaften nach Belieben zu- bzw. abgeschaltet werden können. Zum Nachteil könnte diese Abhängigkeit z.B. bei einem ungewollten Stromausfall werden.

### 3 Magnetlager

Einen Körper frei schwebend rotatorisch oder translatorisch zu lagern ist eine Anforderung, die in der Technik immer häufiger gestellt wird. Ein Magnetlager sorgt für die berührungslose Lagerung eines Systems. Dies geschieht bei einem aktiven Magnetlager durch eine komplexe Anordnung aus Elektromagneten, Sensoren, Leistungsverstärkern und Reglern. Des Weiteren kann die schwebende Lagerung auch permanentmagnetisch erfolgen. Allerdings wird bei einem passiven Lager durch mangelnde Regelbarkeit die Dynamik des Systems eingeschränkt. Die Magnetlager werden in der Regel mit sogenannten Fanglagern ausgestattet. Diese verhindern im Falle einer Havarie, dass es zu einem Kontakt zwischen Rotor und Stator und somit zu der Zerstörung dieser kommt.

#### 3.1 Aktive magnetische Lager

In der Abbildung 8 wird der prinzipielle Aufbau eines aktiven Magnetlagers dargestellt. Dabei misst ein Sensor permanent die Position des Rotors und mit Hilfe eines analogen oder auch eines digitalen Reglers wird das Sensorsignal ausgewertet sowie verarbeitet. Das Regelergebnis steuert über einen Leistungsverstärker den entsprechenden Spulenstrom und damit das Magnetfeld. So wird der Rotor in seiner Sollposition gehalten oder in diese zurückgeführt. /1/

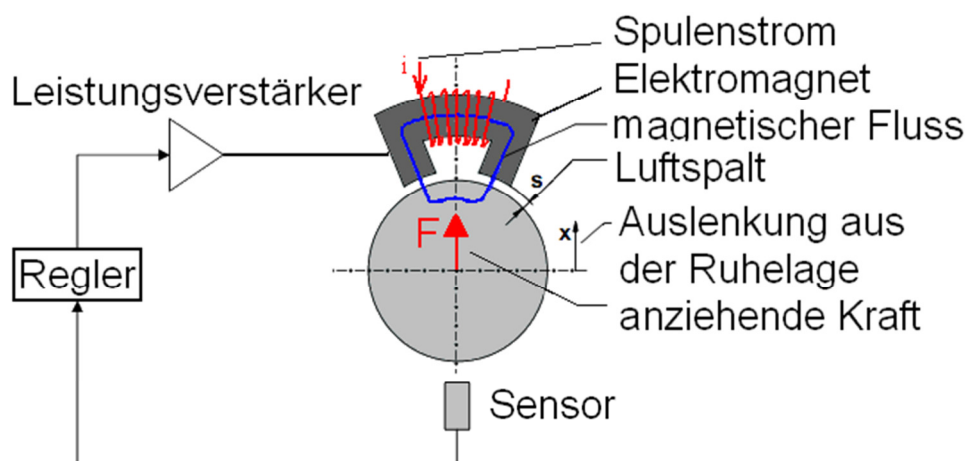


Abbildung 8 - Funktionsprinzip eines aktiven Magnetlagers

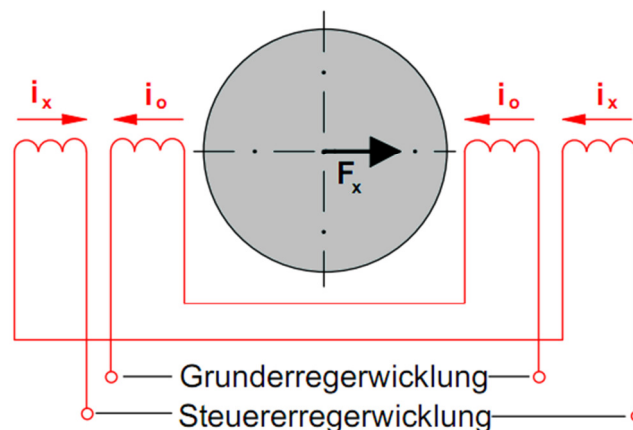
Die für das Magnetlager benötigten Lagerkräfte werden durch Elektromagnete erzeugt, welche sich gut über den Strom einstellen lassen. Vernachlässigt man die Sättigung und Streuverluste lässt sich die Kraft  $F$  in guter Näherung mit Hilfe der Maxwell'schen Gleichungen nach (15) berechnen.

$$F = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot A \cdot B^2 \quad [N] \quad (13)$$

$$\text{mit} \quad k = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{4} \quad (14)$$

$$F = k \cdot \left( \frac{I}{s - x} \right)^2 \quad [N] \quad (15)$$

Dabei entspricht  $I$  dem Strom, welcher durch die Lagerwicklung fließt. Die Verschiebung des Rotors vom Ruheluftspalt  $s$  wird mit  $x$  angegeben. Die Magnetlagerkonstante  $k$  wird unter Vernachlässigung der Eisenverluste aus der Windungszahl, der Fläche des Luftspaltes und der Permeabilität bestimmt. Für eine einfachere Reglerauslegung werden die Lager immer paarweise angeordnet. Weiterhin werden auf jeden Spulenkern zwei getrennte Wicklungen aufgebracht: eine Grunderreger- und eine Steuererregerwicklung, siehe Abbildung 9.



**Abbildung 9 - Radiallager mit Grunderreger- und Steuererregerwicklung /1/**

Der Grunderregerstrom  $i_0$  fließt durch die Grunderregerwicklung der beiden gegenüberliegenden Magnetpole. Durch den konstanten Vormagnetisierungsstrom wird in ihnen ein gleichstarkes Magnetfeld aufgebaut. Der Steuerstrom  $i_x$  fließt durch beide Steuererregerwicklungen. Allerdings sind diese gegensätzlich gewickelt, sodass je nach Stromrichtung das Grunderregerfeld in einem Magnetkreis verstärkt und in dem anderen geschwächt wird. Durch das konstante Grunderregerfeld auf beiden Seiten des Magnetlagers wird die quadratische Abhängigkeit des Stromes, wie in (15) zu erkennen ist, umgangen. Damit ergibt sich eine lineare Abhängigkeit der Kraft  $F$  vom Steuerstrom  $i_x$ . /1/

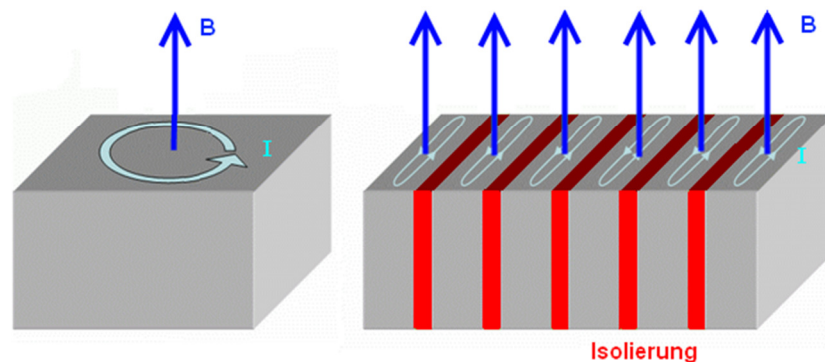


$$F \approx i_x \quad (16)$$

Somit erweitert sich die Kraftgleichung (15) zu:

$$F = k \cdot \left( \frac{i_0 + i_x}{s - x} \right)^2 - k \cdot \left( \frac{i_0 - i_x}{s + x} \right)^2 \quad [N] \quad (17)$$

Der Kern des Elektromagneten eines aktiven magnetischen Lagers besteht aus sogenannten Blechpaketen. Das sind z.B. Blechstreifen mit einer Blechdicke von 0,2mm. Als Grund dafür ist die Verringerung der Wirbelstromverluste zu nennen, siehe Abbildung 10.



**Abbildung 10 - Vergleich Wirbelstrom im Eisenstück (links) und im Blechpaket (rechts) /10/**

Hier wird ein Stück Eisen mit einem Blechpaket verglichen. Die roten Streifen im Blechpaket stellen eine elektrische Isolierung, z.B. Isolierlack, dar. Mit den blauen Pfeilen wird der magnetische Fluss markiert und hellblau sind die entstehenden Wirbelströme eingezeichnet. Das Blechpaket wird parallel zum magnetischen Fluss orientiert. Die durch den magnetischen Fluss induzierte Spannung ist anhängig von der Querschnittsfläche, der magnetischen Flussdichte und der Frequenz. Die Wirbelstromverluste nehmen mit der induzierten Spannung quadratisch zu. Man verkleinert durch das Verwenden von Blechpaketen die Fläche, in der eine Spannung induziert wird und verringert somit auch die Wirbelstromverluste. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ausprägung der Wirbelströme bei einem geblechten Kern geringer ist.

### 3.1.1 Radiallager

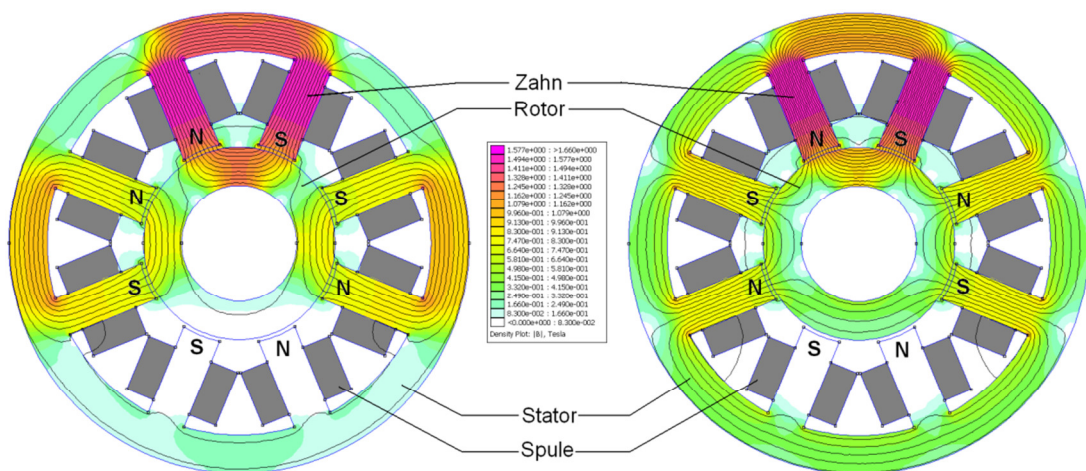
Ein aktives Radiallager kann in folgenden Ausführungen aufgebaut sein:

- Hereropolar
- Homopolar
- Unipolar

Die verschiedenen Typen unterscheiden sich in der Anordnung, im Aufbau und in der Anzahl der Pole sowie in der Ausbildung des magnetischen Flusses. Allerdings wird nur auf die heteropolare und die homopolare Ausführung eingegangen, da diese für die Arbeit von Bedeutung sind.

#### 3.1.1.1 Heteropolarlager

Die Anzahl der Pole der Elektromagneten sind variabel. So ist es z.B. möglich acht, zwölf oder sechzehn Pole auf dem Umfang des Stators zu verteilen. Der für die Erzeugung der Kraft notwendige magnetische Fluss kann auf zwei Arten verlaufen, dabei wird die Reihenfolge der magnetischen Pole am Stator unterschieden. In Abbildung 11 sind diese Varianten simuliert worden.



**Abbildung 11 - 8-poliges Heteropolarlager mit NNSS-Anordnung (links) und NSNS- Anordnung (rechts)**

Das linke Heteropolarlager besitzt eine NNSS-Anordnung was bedeutet, dass die Polarisati-on sich aller zwei Pole ändert. In Folge dessen bilden immer zwei Pole ein festes Polpaar und der magnetische Fluss bildet dabei einen Kreis. Im Gegensatz zu dem rechten Lager bei dem sich die Polung bei jedem Zahn ändert. Man spricht hier von einer NSNS-Anordnung. Der magnetische Fluss fließt über zwei Pole verteilt zurück. /3/

### 3.1.1.2 Homopolarlager

Bei einem Homopolarlager werden an den Enden der Welle nur gleichnamige Pole ausgebildet, siehe Abbildung 12.

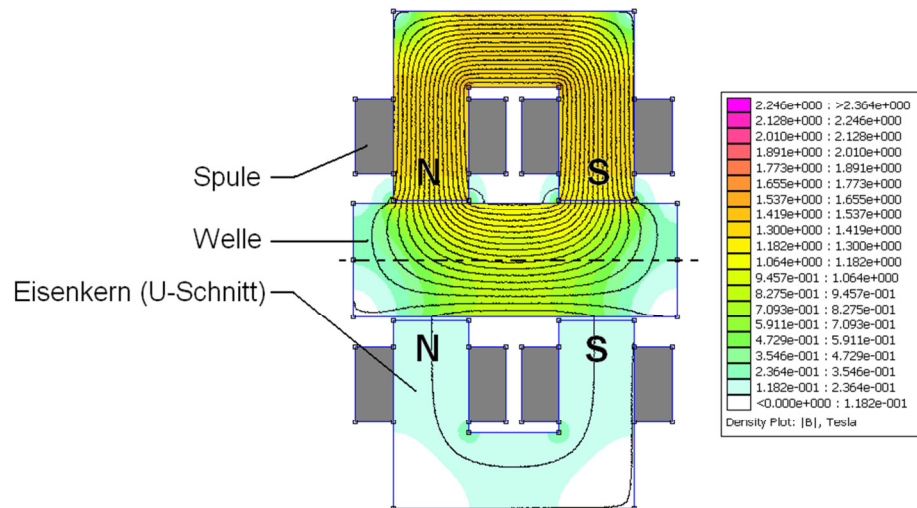
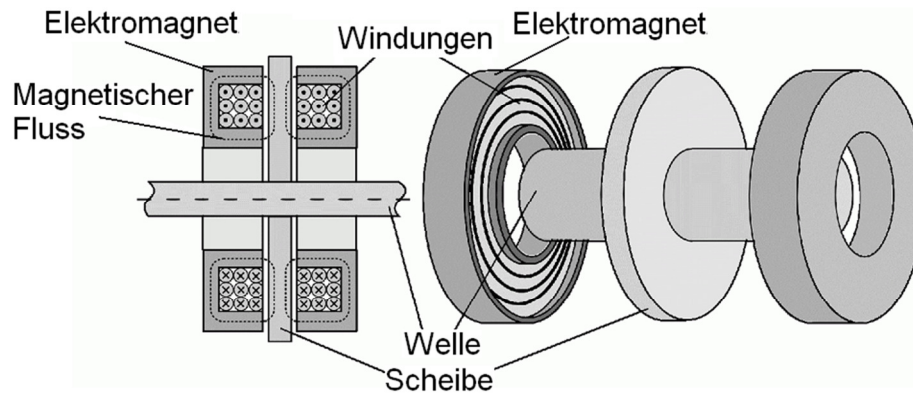


Abbildung 12 - Prinzip eines Homopolarlagers

Hier ist ein Schnitt durch ein Homopolarlager mit U-Kern-Elektromagnet dargestellt. Wie deutlich zu erkennen ist, fließt der magnetische Fluss in einem Kreis vom Kern des Elektromagneten über die Welle zurück. Die Ausbildung der einheitlichen Pole am jeweiligen Ende der Welle bewirkt, dass bei einer Rotorumdrehung das Rotormaterial nicht vollständig ummagnetisiert werden muss. Bei einem Heteropolarlager wird das Rotormaterial mehrfach bei einer Umdrehung vollständig ummagnetisiert. Bei einem Homopolarlager findet nur eine Feldabschwächung zwischen den Polen statt, wodurch Rotorverluste verringert werden. /3/

### 3.1.2 Axiallager

Um eine Welle in axialer Richtung zu halten bzw. zu beeinflussen, wird ein aktives Axiallager verwendet. Der Aufbau eines solchen Lagers ist in Abbildung 13 dargestellt.



**Abbildung 13 - Aktives Axiallager**

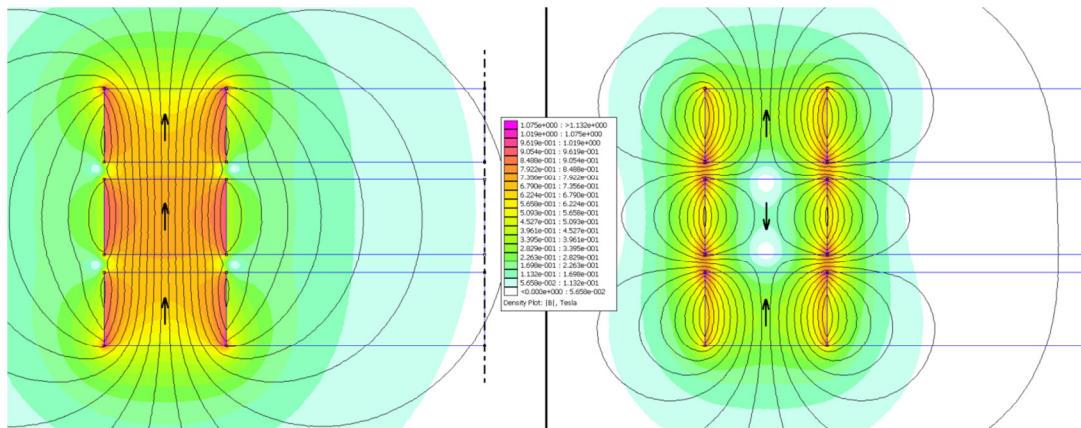
Das Axiallager besteht aus zwei koaxial angeordneten Spulen, welche fest mit dem Stator verbunden sind. Zwischen den gegenüberliegend angeordneten Spulen befindet sich eine Scheibe aus ferromagnetischem Material. Die Lageregelung erfolgt ähnlich wie bei den Radiallagern mit Hilfe von berührungslosen Sensoren und einer Regelung. Durch beide Spulen fließt ein Grunderregerstrom. Eine Lageänderung wird durch die Sensoren erkannt und durch die Regelung verarbeitet. Diese speist einen Steuerstrom in beide Steuererregerwicklungen ein. Durch den gegensätzlichen Wicklungssinn der Steuererregerspulen wird das magnetische Feld auf der Seite, welche der Scheibe näher ist, abgeschwächt und auf der anderen Seite verstärkt. Somit werden die Scheibe und damit die gesamte Welle wieder in die Nulllage bzw. in die gewünschte Position gebracht.

### 3.2 Permanentmagnetische Lager

Als Permanentmagnete werden Stoffe bezeichnet, welche über ein statisches Magnetfeld verfügen. NdFeB ist aufgrund der stark erzeugbaren Magnetfelder und dem vergleichbar geringen Preis der häufigste Vertreter für Permanentmagnete, siehe Abschnitt 2.3.4. Wenn aktive Magnetlager in Betrieb sind, benötigen sie eine nicht zu verachtende Menge an elektrischer Leistung, um das Magnetfeld aufrecht zu erhalten. Daher sind permanentmagnetische Lager hinsichtlich ihrer Herstellungs- und Betriebskosten günstiger als aktive Magnetlager. Nachteilig ist allerdings das instabile Gleichgewicht zwischen Rotor und Stator, welches sich dem Earnshaw-Theorem zufolge in einem schwebenden Magnetlager immer einstellt. Dies macht den Einsatz einer Kombination aus aktiven und passiven Lagern notwendig.

Das erste permanentmagnetische Lager wurde 1955 von R. G. Gilbert zum Patent angemeldet. Seither werden sie vorwiegend in Maschinen mit hohen Rotorgeschwindigkeiten eingesetzt. Für passive magnetische Lager gibt es zwei prinzipielle Wirkungsweisen. Die Magnete

könne sich repulsiv (abstoßend) oder attraktiv (anziehend) gegenüber stehen. In Abbildung 14 wurden zwei Ringlager simuliert. Ein Ringlager besteht aus geschlossenen Magnetringen, welche aus Magnetsegmenten oder aus einem Stück bestehen können.



**Abbildung 14 - attraktiv (links) und repulsiv (rechts) angeordnete Magnetsegmente**

Es wurden jeweils gleichstarke NdFeB Magnete mit einem magnetischen Energieprodukt von 40 MGOe simuliert. Auf der linken Seite ist ein Radiallager aus attraktiv angeordneten und auf der rechten Seite ein Axiallager aus repulsiv angeordneten Magnetringen dargestellt. Mit den Pfeilen ist die Magnetisierungsrichtung dargestellt, wobei die Pfeilspitze in Richtung des magnetischen Nordpols weist. Passive magnetische Lager können als Radial- und auch als Axiallager verwendet werden. Eine weitere nicht rotatorische Anwendung ist z.B. das magnetische Lineartragsystem. Bei einem Radiallager mit attraktiv angeordneten Magnetringen wird das Bestreben der Magnete den magnetischen Fluss nicht zu behindern ausgenutzt. Um dieses zu erreichen, richten sich die Ringe immer parallel zueinander aus. Bei dieser Anordnung ist ein Axiallager zwingend erforderlich, da schon bei einer geringen Auslenkung des mittleren Ringes ein Kräfteungleichgewicht entsteht. Das hat zur Folge, dass der mittlere Ring entweder den oberen oder den unteren Ring berühren würde. Bei der rechts abgebildeten repulsiven Anordnung sind die Magnete ebenfalls bestrebt den Fluss nicht zu behindern und drängen den mittleren Ring aus dem Magnetfeld. Solche abstoßende Magnetkräfte können nur mit Permanentmagneten erzeugt werden. Wird zusätzlich ein aktives Lager eingesetzt um dieses Herausdrängen zu unterbinden, erhält man ein permanentmagnetisches Axiallager. Zu beachten ist, dass bei permanentmagnetischen Lagern die in einer Richtung gewonnene Stabilität immer mit einer Instabilität in der anderen Richtung verbunden ist. Das sagt bereits das Earnshaw-Theorem von 1842 aus. Nach [13] ergibt sich folgender überschlägiger Zusammenhang:

$$s_{rad}(destabilisierend) = -2 \cdot s_{ax}(stabilisierend) \quad (18)$$

Dabei stellt  $s_{rad}$  die radiale und  $s_{ax}$  die axiale Steifigkeit dar. Für passive Radiallager müssen die obigen Beziehungen für die axiale und die radiale Steifigkeit vertauscht werden. Mit Hilfe dieser Beziehungen wird deutlich, wieso nie mehr als vier Freiheitsgrade eines starren Körpers mit Permanentmagneten gelagert werden können.

## **4 Möglichkeiten der Scheibenlagerung**

In der vorliegenden Arbeit soll die Möglichkeit der magnetischen Lagerung eines Kreisringes untersucht werden. Zu überprüfen sind drei Varianten. Die erste Variante besteht aus der aktiven Lagerung in axialer und der passiven Lagerung in radialer Richtung. Bei der zweiten Variante wird die Scheibe radial elektromagnetisch und axial durch Permanentmagnete gelagert. Die zweite Variante wird parallel zu dieser Arbeit von einem Mitarbeiter der EAAT GmbH durchgeführt, wobei die Ergebnisse zu vergleichenden Zwecken in dieser Arbeit berücksichtigt werden. Die dritte Variante der Lagermöglichkeit besteht aus einer vollständigen aktiven magnetischen Lagerung. Eine vollständige passive magnetische Lagerung ist, begründet durch das Earnshaw-Theorem aus Abschnitt 2.2, nicht möglich.

### **4.1 Variante 1 - Axial: aktiv, Radial: passiv**

Die Scheibe soll in axialer Richtung durch Elektromagnete gelagert werden. Permanentmagnete übernehmen die Lagerung in radialer Richtung. Die Dimensionierung der Lager wird in den kommenden Abschnitten erklärt. Ausführliche Berechnungen für die Dimensionierung der Axial- und Radiallager befinden sich im Anhang ab Seite 63. Die Berechnungen wurden mit dem Computeralgebrasystem MathCAD der Firma PTC durchgeführt.

#### **4.1.1 Axiale Lagerung - aktiv**

Die Lagerung in axiale Richtung erfolgt über drei Elektromagnetlagerpaare. Diese befinden sich um  $120^\circ$  versetzt ober- und unterhalb der Scheibe. Für deren Dimensionierung müssen der magnetische Kreis mit der erforderlichen magnetischen Durchflutung und die Anzahl der notwendigen Windungen der Elektromagnete berechnet werden.



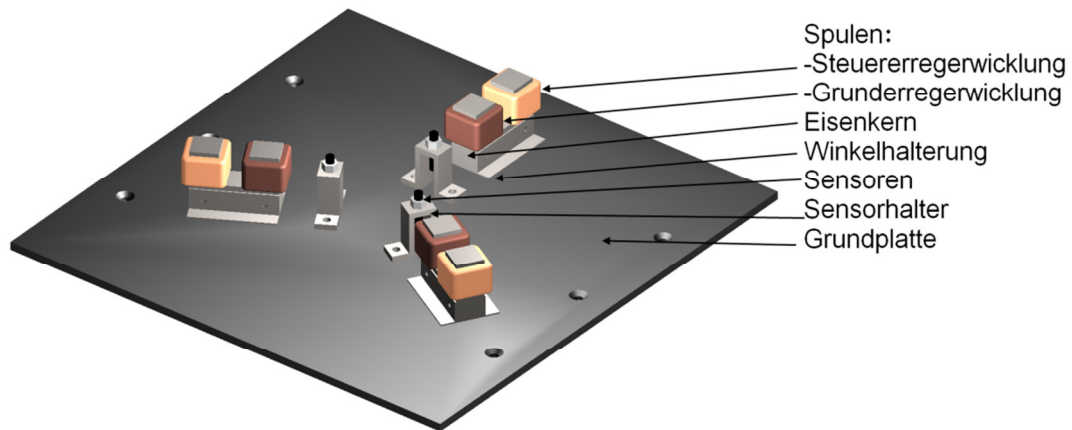


Abbildung 15 - Übersicht aktives Axiallager

#### 4.1.1.1 Magnetischer Kreis

Wie bei einem elektrischen Stromkreis kann der magnetische Kreis auf elektrische Grundgrößen zurückgeführt werden. Für das Axiallager im vorliegenden Fall ergibt sich folgendes ausführliches Ersatzschaltbild, siehe Abbildung 16.

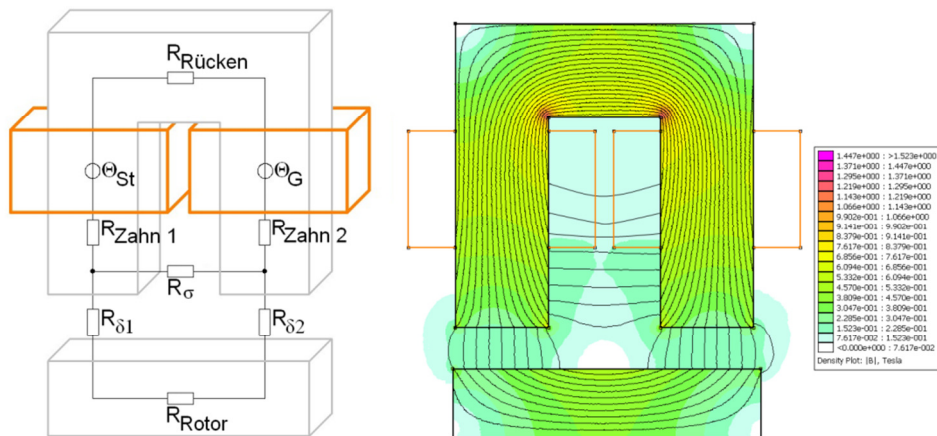
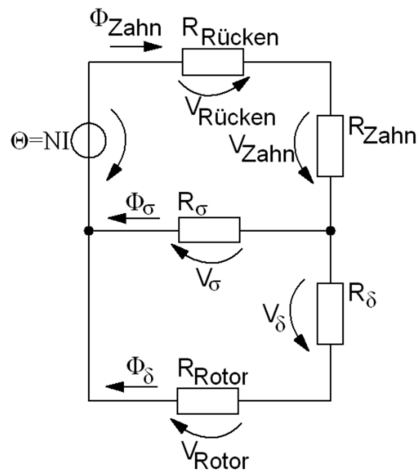


Abbildung 16 - Ersatzschaltbild des magnetischen Kreis und Flussbild

Linkerhand ist das elektrische Ersatzschaltbild (im Folgenden ESB genannt) dargestellt. Grau sind der Eisenkern sowie der Rotor und orange die Spulen eingezeichnet. Die Spulen sind als Spannungsquellen eingezeichnet, die Eisenwiderstände, die Luftspalte und die Streuung sind durch ohm'sche Widerstände ersetzt. Dabei entsprechen die Grund- bzw. die Steuererregerspule  $\Theta_G$  und  $\Theta_{St}$ , die Eisenwiderstände vom Statorrücken den Zähnen und dem Rotor  $R_{Rücken}$ ,  $R_{Zahn 1+2}$  sowie  $R_{Rotor}$ . Die Luftspalte und der Streuweg werden mit  $R_{\delta 1+2}$  und  $R_{\sigma}$  angegeben.

Dieses so entstandene ESB kann zusammengefasst und vereinfacht werden. Daraus ergibt sich das zur Berechnung herangezogene, vereinfachte Ersatzschaltbild nach Abbildung 17.





**Abbildung 17 - vereinfachtes Ersatzschaltbild**

Die Spannungsquellen können zu einer Quellspannung vereinigt werden, ebenso wie die magnetischen Widerstände der Zähne und die des Luftspalts.

Um den magnetischen Kreis bzw. das Axiallager berechnen zu können, ist es notwendig eine erste Abschätzung bezüglich der Maße zu treffen. Im Laufe der Dimensionierung könnte es erforderlich werden die Geometrie der Eisenkerne zu verändern. So könnte sich z.B. die Zahnlänge auf Grund der Anzahl der notwendigen Wicklungen verlängern.

Für die geforderte Kraftwirkung im Luftspalt muss dieser eine bestimmte Mindestfläche aufweisen. Die gesamte erforderliche Fläche des Luftspalts lässt sich nach (19) berechnen.

$$A_{\delta ges} = \frac{2 \cdot F_{Pol} \cdot \mu_0}{B_{\delta}^2} \quad [mm^2] \quad (19)$$

Für einen Luftspalt ergibt sich:

$$A_{\delta} = \frac{2 \cdot F_{Pol} \cdot \mu_0}{2 \cdot B_{\delta}^2} \quad [mm^2] \quad (20)$$

Die Kraft pro Pol  $F_{Pol}$  ergibt sich aus der Masse des zu lagernden Ringes und der der zu erwartenden Kräfte. Die Luftspaltinduktion  $B_{\delta}$  wird mit 1T angenommen.

Die einzelnen Abschnitte aus dem ESB in Abbildung 17 werden als homogene Magnetabschnitte betrachtet, somit können diese mit magnetischen Widerständen charakterisiert und der magnetische Kreis mit folgenden Gleichungen beschrieben werden:

$$\Theta = (V_{Rücken} + V_{Zahn}) + (V_{\delta} + V_{Rotor}) \quad [A] \quad (21)$$

$$\Theta = (V_{RZ}) + (V_{\delta R}) \quad [A] \quad (22)$$

$$\Phi_{Zahn} = \Phi_{\sigma} + \Phi_{\delta} \quad [Vs] \quad (23)$$

Der kraftwirkende Fluss  $\Phi_{\delta}$  im Luftspalt ergibt sich:

$$\phi_{\delta} = A_{\delta} \cdot B_{\delta} \quad [Vs] \quad (24)$$

Es gelten weiterhin folgende Zusammenhänge für die magnetische Spannung  $V_{\delta}$  im Luftspalt  $\delta$ :

$$V_{\delta} = H_{\delta} \cdot \delta \quad [A] \quad (25)$$

mit

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \quad \left[ \frac{A}{m} \right] \quad (26)$$

Die magnetische Spannung ist direkt von der Größe des Luftspaltes und der Flussdichte abhängig. Analog dazu lassen sich die magnetischen Spannungen im U-Kern und im Rotor berechnen. Die magnetische Spannung im Rotor ergibt sich aus:

$$V_{Rotor} = H_{Rotor} \cdot l_{Fe,Rotor} \quad [A] \quad (27)$$

Zu dem magnetischen Fluss im Zahn des U-Kerns muss der Streufluss  $\Phi_{\sigma}$  addiert werden, welcher sich nach (28) aus dem Produkt des Streufaktors  $\sigma$  und dem magnetischen Fluss  $B_{\delta}$  im Luftspalt ergibt. Der Streufaktor kann nach /15/ S.13 mit 5% angenommen werden.

$$\phi_{\sigma} = \sigma \cdot \phi_{\delta} \quad [Vs] \quad (28)$$

Magnetische Spannung im U-Kern:

$$V_{\delta} = 2 \cdot V_{Zahn} + V_{Rücken} \quad [A] \quad (29)$$

$$\text{mit} \quad V_{\text{Zahn}} = H_{\text{Zahn}} \cdot l_{\text{Fe,Zahn}} \quad [A] \quad (30)$$

$$\text{und} \quad V_{\text{Rücken}} = H_{\text{Rücken}} \cdot l_{\text{Fe,Rücken}} \quad [A] \quad (31)$$

Die magnetischen Feldstärken für das Rotor- und Statormaterial werden aus den Magnetisierungskennlinien entsprechend der vorherrschenden Flussdichte übernommen. /14/ Für die Eisenlängen  $l_{\text{Fe}}$  wird die mittlere Eisenlänge, wie in Abbildung 18 eingezeichnet, angenommen.

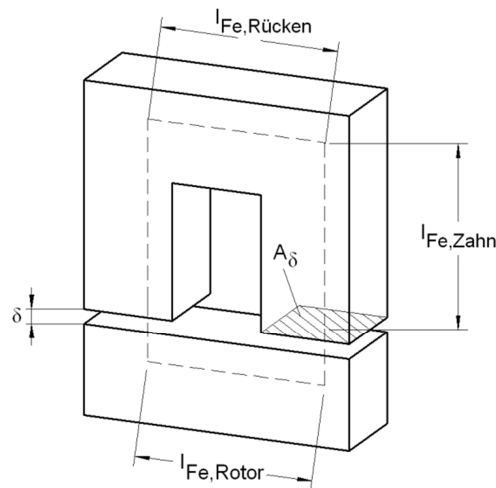


Abbildung 18 - Mittlere Eisenlängen

Daraus ergibt sich die Gesamtdurchflutung:

$$\Theta_{\text{ges}} = V_{\text{ges}} = V_{\text{Rücken}} + 2 \cdot V_{\text{Zahn}} + 2 \cdot V_{\delta} + V_{\text{Rotor}} \quad [A] \quad (32)$$

#### 4.1.1.2 Berechnung der Wicklungen

Grundlagen für die Dimensionierung der Spulen sind die aufzubringende magnetische Durchflutung und der fließende Spulenstrom. Ausgehend von einem Steuerstrom  $I_{\text{st}} = 15\text{A}$  und einem Grunderregerstrom von  $I_G = 6\text{A}$ , kann die notwendige Windungszahl  $N$  ermittelt werden. Da die Spulen, wie in 3.1 beschrieben, symmetrisch angesteuert werden, muss jede Spule nur die halbe Durchflutung aufbringen, um die Gesamtdurchflutung zu erreichen.

$$N_{\text{St}} = \frac{\Theta}{2 \cdot I_{\text{St}}} \quad [A] \quad (33)$$

$$N_G = \frac{\Theta}{2 \cdot I_G} \quad [A] \quad (34)$$

Die Höhe  $h_{Sp}$  und die Ausdehnung in radialer Richtung vom Statorzahn  $d_{Sp}$  der Spule sind abhängig von dem Drahtdurchmesser  $d_D$  und der Anzahl der übereinanderliegenden Lagen  $A_L$ . In beiden Fällen wird von der ungünstigsten Wicklung bzw. von der platzintensivsten Wickelmethode ausgegangen. Wie in Abbildung 19 dargestellt ist, gestaltet es sich am ungünstigsten die Drähte übereinander und nicht in die Täler zu legen. In der Praxis verrutschen die Drähte allerdings oft selbst in das „Tal“.

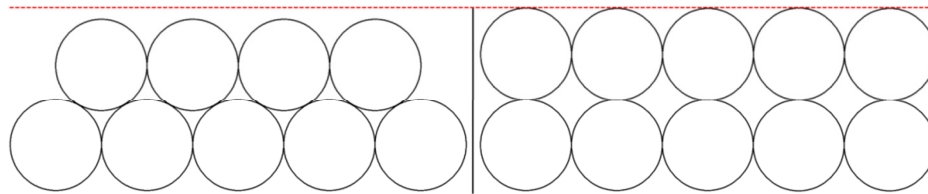


Abbildung 19 - Möglichkeiten der Drahtanordnungen

Mit dieser Annahme wird eine Abschätzung des maximalen Platzbedarfs getroffen. Dabei ist zu beachten, dass bei dem Drahtdurchmesser auch die Isolierende Lackschicht mit berücksichtigt werden muss.

$$h_{Sp} = \frac{N \cdot d_{Sp}}{A_L} \quad [mm] \quad (35)$$

$$b_{Sp} = d_D \cdot A_L \quad [mm] \quad (36)$$

Nach ausführlichen Berechnungen, siehe Anhang 7 und Anhang 8, ergibt sich folgendes Diagramm für  $h_G$  und  $b_G$ :

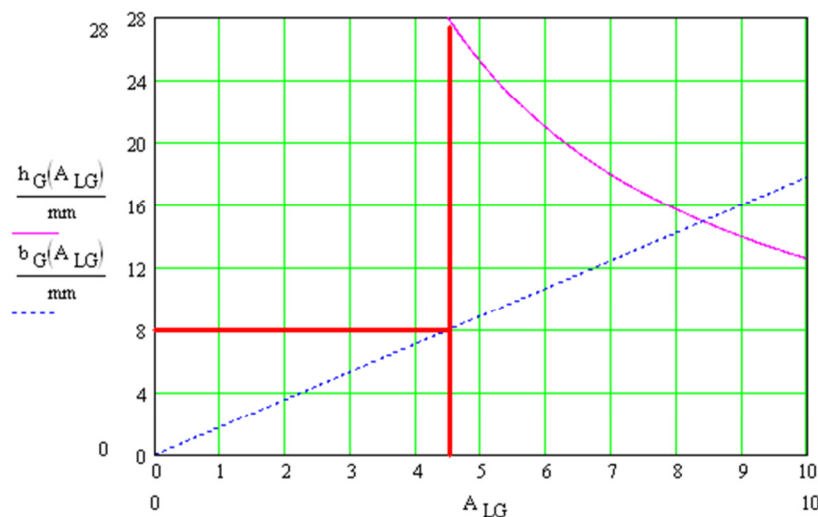


Abbildung 20 - Abhängigkeit der Anzahl der Lagen für die Grunderregung

Die blau gestrichelte Linie gibt die Ausdehnung in radialer Richtung an und die magentafarbene Kurve stellt die Höhe in Abhängigkeit der Lagenanzahl dar. Da eine maximale Ausdeh-

nung in radialer Richtung von 8mm nicht überschritten werden darf, wurde an der Y-Achse bei 8mm ein roter Strich gezogen. Anhand des Schnittpunktes mit der blau gestrichelten Linie erkennt man, dass die maximale Anzahl der Lagen 5 beträgt. Wird der Schnittpunkt mit der Kurve für die Spulenhöhe verbunden, erkennt man, dass die maximale Höhe nicht überschritten wird. Stellt man die gleiche Abhängigkeit für die Steuererregerwicklung dar, erhält man folgendes Diagramm:

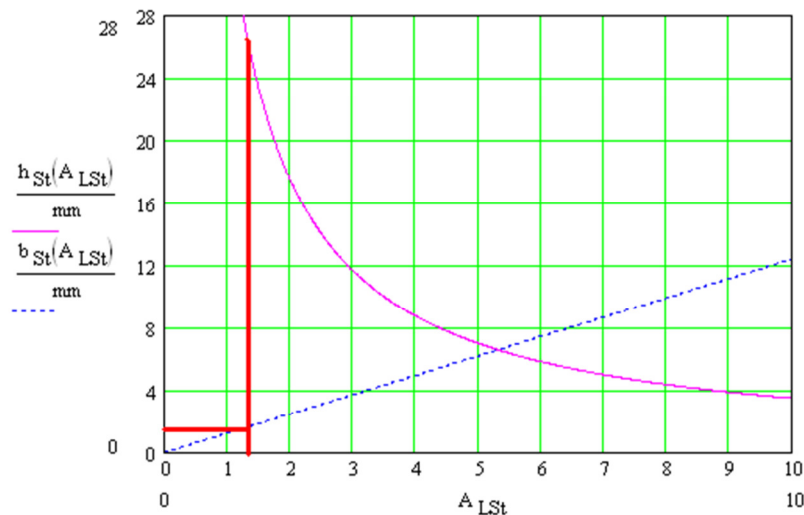


Abbildung 21 - Abhängigkeit der Anzahl der Lagen für die Steuererregerwicklung

Wird in diesem Fall, anders als bei der Grunderregung von der maximalen Spulenhöhe von 28mm ausgegangen und wird eine Linie auf der X-Achse (die Spulenbreite) gezogen, erkennt man, dass lediglich nur 2 Lagen notwendig sind. Aus diesem Grund können Rückschlüsse auf die Anzahl der Lagen für die Grunderregung gezogen werden. Man kann problemlos eine größere radiale Ausdehnung annehmen und damit die Lagenzahl erhöhen. In beiden Fällen kann die maximale Höhe verringert werden, was wiederum eine Erhöhung der Lagenanzahl zu Folge hat. Durch diese Verringerung kann im Fehlerfall eine evtl. Beschädigung der Spulen durch den Rotor verhindert werden.

#### 4.1.2 Radiale Lagerung - passiv

Die radiale Lagerung des Kreisringes soll mit Hilfe von attraktiv angeordneten Permanentmagneten erfolgen, siehe Abbildung 14. Die obere und untere Lagerhälfte ist fest mit dem Gehäuse verbunden und besteht aus Magnetsegmenten, welche zu Ringmagneten zusammengesetzt sind. Mittig befindet sich die zu lagernde Scheibe an welcher sich weitere Permanentmagnetsemente befinden. Diese sind an drei Stellen um je 120° versetzt auf der Scheibe angebracht. Der Vorteil dieser Segmente ist es, dass die Masse des Ringes gering gehalten werden kann. Für die Dimensionierung des Radiallagers werden die Ergebnisse

aus /16/ und /17/ zugrunde gelegt. Es werden zusätzlich weitere Aussparungen in dem Kreisring angebracht, um im Bedarfsfall die Steifigkeit durch das Einsetzen weiterer Magnetsegmente zu erhöhen.

Um die Lagersteifigkeit bestimmen und vergleichen zu können, ist es notwendig den Begriff des Lagerdrucks  $p_{mag}$  einzuführen. Dieser wird nach (37) oder (38) bestimmt.

$$p_{mag} = \frac{\mu}{2} \cdot H^2 \quad [Pa] \quad (37)$$

$$p_{mag} = \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot B^2 \quad [Pa] \quad (38)$$

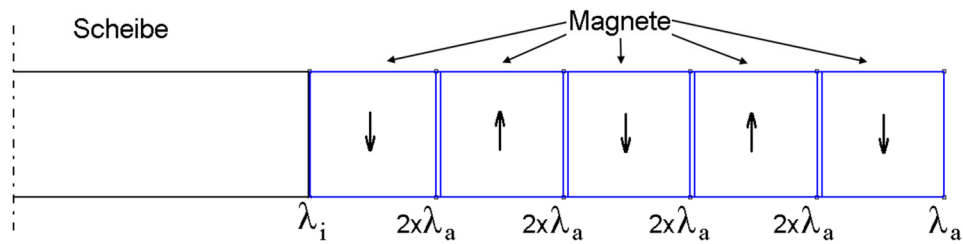
$$\text{Mit} \quad \mu = \mu_0 \quad \left[ \frac{V \cdot s}{A \cdot m} \right] \quad (39)$$

Der magnetische Lagerdruck ist quadratisch von der magnetischen Flussdichte  $B$  bzw. von der magnetischen Feldstärke  $H$  im Lagerspalt abhängig. Für die Permeabilität im Lagerspalt kann die des Vakuums angenommen werden. Zusätzlich wird in /16/ die Referenzsteifigkeit  $s_{ref}$  eingeführt.

$$s_{ref} = \lambda \cdot p_{ref} \quad \left[ \frac{N}{mm} \right] \quad (40)$$

$$\text{Mit} \quad p_{ref} = \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot B_r^2 \quad [Pa] \quad (41)$$

Die Referenzsteifigkeit ist das Produkt aus dem Referenzdruck  $p_{ref}$  und der Randlänge  $\lambda$  des Permanentmagneten. Der Referenzdruck wird nach (41) berechnet, allerdings wird nicht wie an früherer Stelle die Flussdichte im Lagerspalt eingesetzt. Diese ist ortsabhängig und deshalb nicht eindeutig zu bestimmen. Es wird die Remanenzflussdichte  $B_r$  aus dem Datenblatt des verwendeten Magnetmaterials entnommen. Die Randlänge  $\lambda$  bei permanentmagnetischen Multiringlagern wird aus den inneren Randlinien  $\lambda_i$  und den äußeren Randlinien  $\lambda_a$  berechnet. Dabei werden die inneren Randlinien gegenüber den äußeren Randlinien mit dem Faktor 4 bewertet. Unter den inneren Randlinien versteht man die Randlinie mit dem geringsten Radius. Als äußere Randlinien werden alle anderen bezeichnet. Es ist zu beachten, dass bei dem Aufeinandertreffen unterschiedlich magnetisierter Segmente immer zwei Randlinien entstehen. In Abbildung 22 werden 5 unterschiedlich magnetisierte Segmente dargestellt.



**Abbildung 22 - Randlinien eines Multiringlagers**

Es ergeben sich eine äußere und neun innere Randlinien. Somit erhält man für  $\lambda$ :

$$\lambda = \lambda_i + 4 \cdot \lambda_a \quad [m] \quad (42)$$

$$\lambda = \lambda_i + 4 \cdot (9 \cdot \lambda_a) \quad [m] \quad (43)$$

Im vorliegenden Fall werden Magnetsegmente mit einer quadratischen Fläche von 9mm und einer Tiefe von 35mm verwendet. Somit ergibt sich für eine Radiallagerstelle eine Randlänge von ca. 1,3m. Eine ausführliche Berechnung befindet sich in Anhang 7.

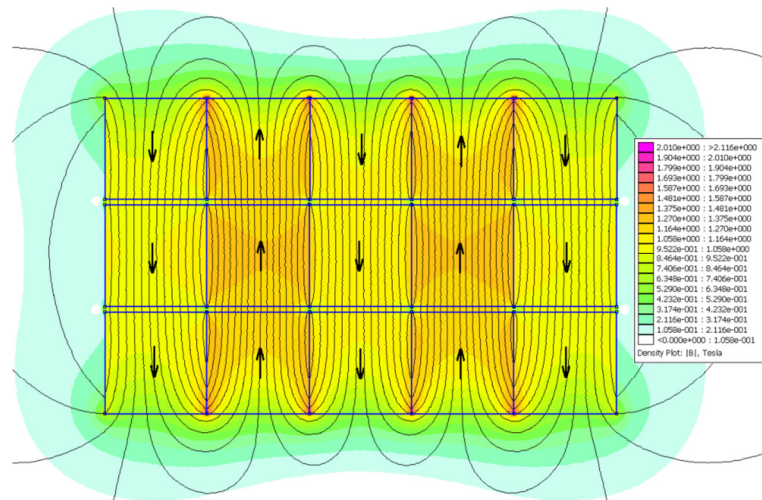
Anhand der in /16/ aufgeführten Tabelle kann nun die axiale- und radiale Steifigkeit  $s_{ax}$  bzw.  $s_{rad}$  von den axial attraktiven Ringlagern mit quadratischem Querschnitt ermittelt werden. Wird ein Radiallager mit einem nicht quadratischen Querschnitt verwendet, muss die Steifigkeit gesondert mit einem FEM-Programm ermittelt werden.

$w / b$	$-s_{ax} / s_{ref}$ (A)	$2 s_{rad} / s_{ref}$ (B)	$p_{mag} / p_{ref}$ (C)
0,05	0,76	0,70	0,45
0,10	0,56	0,52	0,39
0,15	0,44	0,42	0,34
0,20	0,36	0,34	0,30
0,25	0,30	0,29	0,27
0,30	0,26	0,25	0,24

**Tabelle 2 - Tabelle zur Berechnung permanentmagnetischer Ringlager /16/**

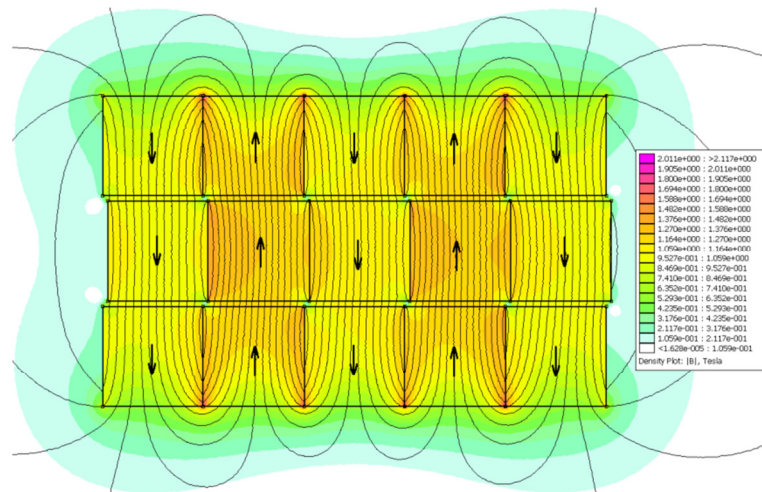
Zunächst muss das Verhältnis der Lagerspaltweite  $w$  und der Polbreite  $b$  gebildet werden. Aus den geometrischen Bedingungen ergibt sich in diesem Fall ein Verhältnis von 0,05. Auch hier befindet sich die ausführliche Berechnung im Anhang 7. Die in der Tabelle 2 verwendeten Beziehungen haben nur ihre Gültigkeit bei Lagerstellen mit einem Lagerspalt. Sind wie im vorliegenden Fall zwei Lagerspalte vorhanden, muss die Referenzsteifigkeit verdoppelt werden. Bei  $n$  Lagerspalten muss somit die Referenzsteifigkeit mit  $n$  multipliziert werden. Unter Verwendung von (38) und (40) und der Tabelle 2 ergibt sich eine radiale Steifigkeit für

eine Lagerstelle von ca. 563 N/mm. Um die errechneten Werte zu überprüfen, wurde das passive Radiallager mit einem FEM-Programm simuliert. Die in der Simulation verwendete Anordnung ist in Abbildung 23 abgebildet.



**Abbildung 23 - Simulation des Radiallagers**

Es wird von einer maximalen radialen Verschiebung von 0,3mm ausgegangen. Bei einer größeren radialen Verschiebung kommt es zu einer Berührung mit den Fanglagern. Diese Verschiebung wurde mit dem FEM-Programm simuliert und in Abbildung 24 dargestellt.

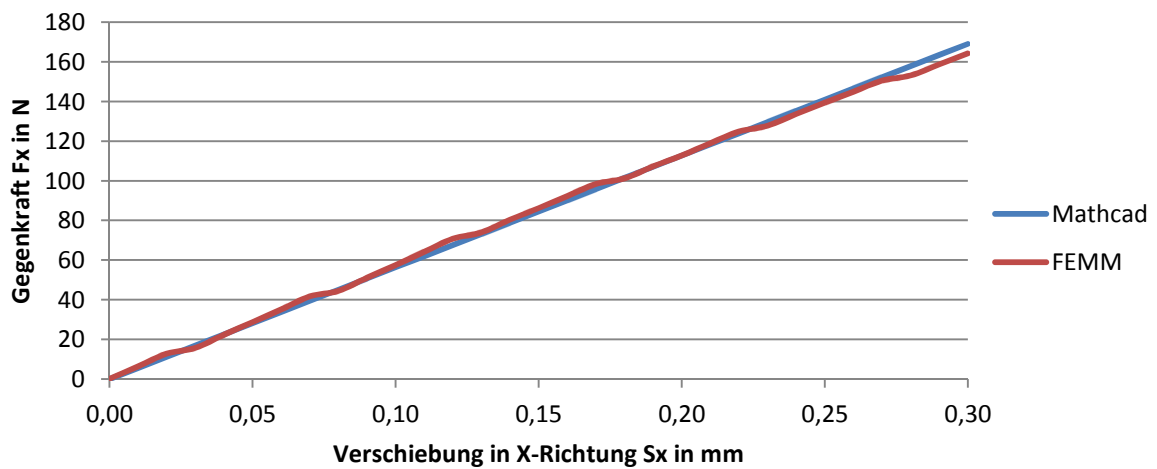


**Abbildung 24 - Radiallager - Verschiebung in X-Richtung um 0,3mm**

Im Vergleich mit dem unausgelenkten Lager ist die Verschiebung des magnetischen Flusses deutlich zu erkennen. Bei einer Verschiebung um 0,3mm ergibt sich der Simulation nach eine Gegenkraft von 164N. Der Berechnung in Anhang 7 zufolge erhält man eine Gegenkraft von 169N. Die relativ geringe Abweichung entsteht dadurch, dass bei der Berechnung, anders als bei der Simulation, eine Normierung vorgenommen wurde. Dass die Normierung

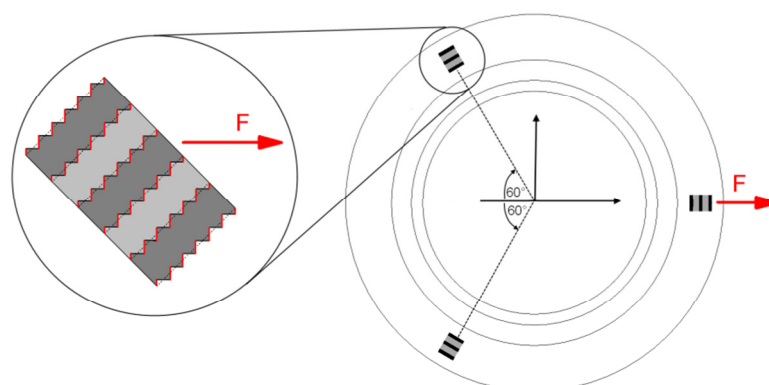


zulässig ist, zeigt sich in Abbildung 25. Eine größere Abbildung mit eingezeichneten Messpunkten befindet sich im Anhang 8.



**Abbildung 25 - Vergleich Simulation mit Berechnung**

Beim Vergleich der beiden Kurven ist zu erkennen, dass die Berechnung mit der Simulation gut übereinstimmt. Die gesamte radiale Steifigkeit der Scheibe ergibt sich aus den Winkelbeziehungen der, wie eingangs beschrieben, drei Lagerstellen. Die Kraftwirkung tritt nur in dieser Größenordnung auf, wenn die Magnetsegmente kongruent zu einander ausgerichtet sind. Durch die versetzte Anordnung trifft das im Idealfall nur auf eine Lagerstelle zu. Die anderen beiden Radiallager wirken jeweils nur mit der halben Gegenkraft. Dieser Faktor  $\frac{1}{2}$  ist geometrisch begründet. Wenn man sich vorstellt, dass die Randfläche der Magnetsegmente aus Rechteckelementen besteht wird deutlich, dass nur die Hälfte der Polkantenelemente senkrecht zur Verschiebungsrichtung stehen und damit zur Kraftwirkung beitragen. In Abbildung 26 sind die wirksamen Kanten rot dargestellt.



**Abbildung 26 - Anordnung Radiallagerstellen mit wirksamen und unwirksamen Kanten**

Daraus ergibt sich eine gesamte radiale Steifigkeit von 1,13 MN/m und bei einer Auslenkung von 0,3mm eine Gegenkraft von 330N. Die bereits in (18) beschriebene Abhängigkeit zwi-

schen der radialen und der axialen Steifigkeit lässt sich ebenso mittels der Tabelle 2 berechnen. Damit ergibt sich eine axiale Beeinflussung von  $-2,44\text{MN/m}$ . Diese Beeinflussung ist bei der Auslegung des Axiallagers zu berücksichtigen, da es diese Kräfte zusätzlich mit aufnehmen muss.

## 4.2 Variante 2 - Axial: passiv, Radial: aktiv

Diese Variante bei welcher der Kreisring in axialer Richtung passiv und in radialer Richtung aktiv gelagert wird, wurde bei der EAAT durchgeplant. Die Ergebnisse sollen hier kurz vorgestellt werden.

Die Idee ist es, den Kreisring radial wie eine Welle magnetisch zu lagern. Zu diesem Zweck wird der Radiallagerstator um den Kreisring außenherum angebracht. Das Lager besteht aus mehreren Zähnen, auf denen die Steuer- und die Grunderregerspulen aufgebracht sind, in Abbildung 27 sind diese rot und gelb dargestellt.

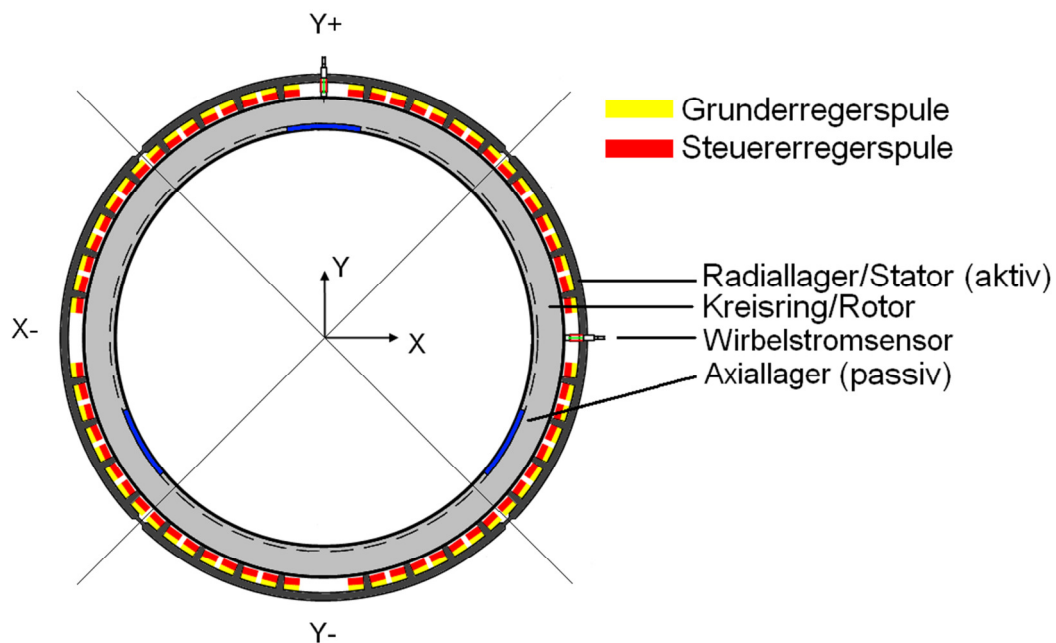


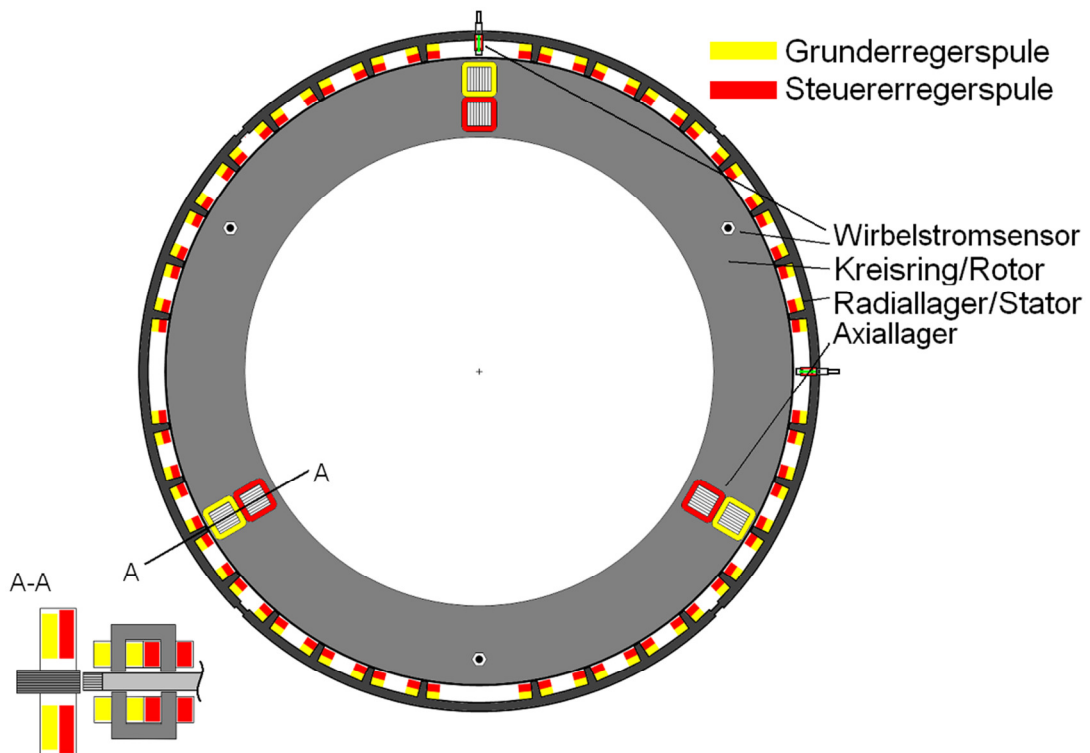
Abbildung 27 - Variante 2 - Axial: passiv, Radial: aktiv

Die Lageerfassung erfolgt über Wirbelstromsensoren. Geregelt wird die Lage, ähnlich wie bei der Variante 1 über die X- und Y-Ebene. Es bilden immer 16 Zähne bzw. Spulenpaare eine Ebene. Die Spulen dieser Ebene werden je nach Bedarf angesteuert und korrigieren somit die Lage des Kreisringes. Die axiale Lagerung erfolgt bei dieser Variante über Permanentmagnete, diese sind in Abbildung 27 blau dargestellt. Ähnlich wie bei der Variante 1 sind auf dem Kreisring nur Segmente aufgebracht. Deren Vorteil ist es, dass durch diese Segmente die Masse des Kreisringes gering gehalten wird. Ober- und unterhalb des Ringes befinden

sich die Gegenstellen zu dem Radiallager. Auch hier werden mehrere Magnetsegmente zu geschlossenen Ringen zusammengefügt. Die Magnete werden anders als bei der Variante 1 nicht auf Anziehung, sondern auf Abstoßung gepolt, siehe Abbildung 14. Ordnete man die Magnete attraktiv an, schlussfolgert sich daraus, dass schon bei einer geringen Auslenkung in axialer Richtung die Anziehungskraft des Magneten mit dem geringeren Luftspalt größer ist, als die gegenüberliegende. Dadurch entstünde ein Kräfteungleichgewicht. Der Kreisring würde seine Mittellage verlassen und die Magnete würden sich berühren. Die passive Lagerung mit Permanentmagneten bietet eine höhere Steifigkeit gegenüber der radialen permanentmagnetischen Lagerung mit derselben Anzahl an Magneten. Außerdem ist die Destabilisierung in radialer Richtung nicht doppelt, sondern lediglich halb so groß, siehe (18). Das hat zur Folge, dass eine geringere radiale Lagerkraft benötigt wird. Ein Nachteil dieser Variante ist, dass das aktive Radiallager mehr Platz beansprucht. Im Anhang 9 befindet sich dazu eine bemaßte Zeichnung. Durch die Zähne und den Statorrücken des Radiallagers vergrößert sich dessen Außendurchmesser. Zusätzlich muss der Außenradius geblecht hergestellt werden, um den entstehenden Wirbelströmen entgegen zu wirken. Im Vergleich der beiden Varianten kann bei dieser Lagermöglichkeit der Kreisring mit einem größeren Innendurchmesser konstruiert werden. Dieser Fakt ergibt sich daraus, dass bei der Variante 1 die Mindestbreite des Ringes durch die Elektromagnete des Axiallagers vorgegeben wird.

### **4.3 Variante 3 - Axial: aktiv, Radial: aktiv**

Bei dieser Variante wird der Kreisring vollständig durch Elektromagneten gelagert, siehe Abbildung 28. Diese Methode vereinigt den großen Vorteil der Regelbarkeit in axialer sowie in radialer Richtung. Man kann durch das Anpassen der Regelparameter bzw. der Scheibenposition aktiv in den Prozess eingreifen und das in axialer sowie in radialer Richtung. Allerdings ist zu beachten, dass durch den Einsatz von Elektromagneten in beiden Lagerstellen höhere Kosten anfallen. Nicht nur durch den größeren Fertigungsaufwand z.B. beim Wickeln der Spulen, sondern auch der Energiebedarf während des Betriebs steigt. Zusätzlich werden fünf Lagesensoren für diese Variante benötigt. Weiterhin ist auch in diesem Fall ein größerer Außendurchmesser für den Stator notwendig. Der Kreisring muss genauso breit gewählt werden wie in Variante 1, um die axiale Lagerung zu ermöglichen.



**Abbildung 28 - Variante 3 - Axial: aktiv, Radial: aktiv**

In dieser Abbildung wird eine vollständig magnetische Lagerung des Kreisringes dargestellt. Der äußerste dunkelgraue Ring stellt das Radiallager dar. Auf dessen Zähnen befinden sich die Grund- und die Steuererregerspulen. Der Kreisring ist hier hellgrau dargestellt und wird durch drei um  $120^\circ$  versetzte Elektromagnete axial fixiert. Die drei senkrecht zum Kreisring angeordneten Wirbelstromsensoren detektieren eine Verschiebung in axialer Richtung und die beiden anderen Wirbelstromsensoren erkennen eine radiale Verschiebung. Der Regelprozess findet, wie bereits bei Variante 1 und 2 erklärt, über eine Messwertanpassung und Lageregelung mit anschließender Stromregelung statt.

## 5 Unterschiede zwischen Welle und Scheibe

Die magnetische Lagerung einer Welle wurde bei der EAAT schon häufiger durchgeführt. Da sich aber eine Scheibe in ihrer Rotordynamik ganz anders als eine Welle verhält, ist es in dieser Arbeit notwendig auf die dabei auftretenden Unterschiede einzugehen.

### 5.1 Das Massenträgheitsmoment

Das Massenträgheitsmoment  $J$  gibt den Widerstand eines starren Körpers gegenüber einer Änderung seiner Rotationsbewegung an. So ist das Massenträgheitsmoment folgendermaßen definiert:

$$J = \int_M r^2 dm \quad \left[ \text{kg} \cdot \text{m}^2 \right] \quad (44)$$

Hierbei ist zu beachten, dass  $M$  die Masse des Körpers und  $r$  der senkrechte Abstand des Massenelements  $dm$  zur betrachteten Achse ist. Allerdings ist  $r$  nicht zwangsläufig der Ortsvektor vom Ursprung des Koordinatensystems zum Massenelement und auch nicht der Radius einer Scheibe oder eines Zylinders.

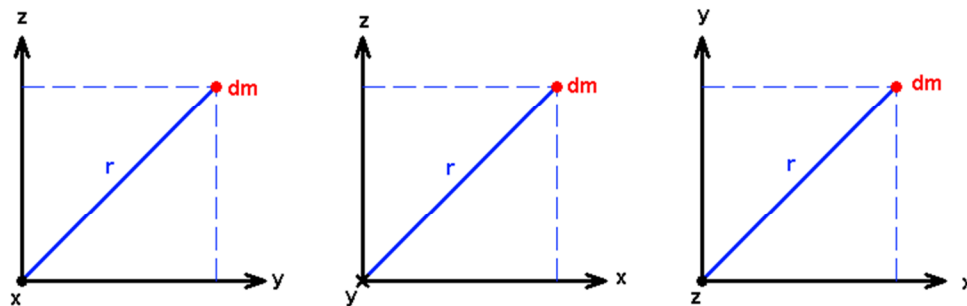


Abbildung 29 - Koordinatensysteme für das Trägheitsmoment

Die Koordinatensysteme für das Trägheitsmoment werden nach der sogenannten „Rechte-Hand-Regel“ gebildet. Daraus ergibt sich, dass die X- bzw. die Z-Achse im ersten und im dritten Diagramm aus der Zeichenebene heraus zeigt. Die Y-Achse im zweiten Diagramm zeigt in die Zeichenebene hinein. Unter Verwendung von (44) und der Koordinatensysteme aus Abbildung 29 ergeben sich folgende Trägheitsmomente:

$$J_X = \int_M (y^2 + z^2) dm \quad \left[ \text{kg} \cdot \text{m}^2 \right] \quad (45)$$

$$J_Y = \int_M (X^2 + Z^2) dm \quad [kg \cdot m^2] \quad (46)$$

$$J_Z = \int_M (X^2 + Y^2) dm \quad [kg \cdot m^2] \quad (47)$$

Um das Massenträgheitsmoment für eine magnetisch gelagerte Welle, welche um die Z-Achse rotiert, zu berechnen, werden Zylinderkoordinaten wie folgt gewählt:

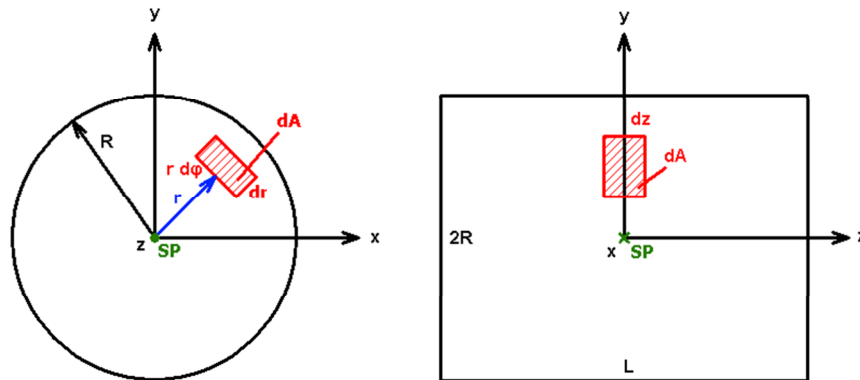


Abbildung 30 - Zylinder in Koordinatensystem

$$x = r \cos(\varphi) \quad (48)$$

$$y = r \sin(\varphi) \quad (49)$$

$$z = z \quad (50)$$

$$\text{mit} \quad 0 \leq r \leq R \quad (51)$$

$$\text{und} \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (52)$$

$$\text{und} \quad -\frac{L}{2} \leq z \leq \frac{L}{2} \quad (53)$$

Weiterhin gilt:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (54)$$

Für das Massenelement  $dm$ :

$$dm = \rho \cdot dV \quad (55)$$

Für das Volumenelement  $dV$ :

$$dV = r \cdot dr \cdot d\varphi \cdot dz \quad (56)$$

Damit ergibt sich das Massenträgheitsmoment für eine Welle  $J_{Z,Welle}$  als Integral dritten Grades zu:

$$J_{Z,Welle} = \rho \cdot \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R r^3 dr d\varphi dz \quad [kg \cdot m^2] \quad (57)$$

$$J_{Z,Welle} = \rho \cdot \frac{R^4}{4} \cdot 2\pi \cdot L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L \cdot \pi \cdot R^4 \quad [kg \cdot m^2] \quad (58)$$

$$\text{mit} \quad M = \rho \cdot L \cdot \pi \cdot R^2 \quad [kg] \quad (59)$$

$$J_{Z,Welle} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot R^2 \quad [kg \cdot m^2] \quad (60)$$

Für eine Dünne Scheibe gilt:

$$L \ll R \quad (61)$$

Daraus ergibt sich aus (59) und (60) das Massenträgheitsmoment für eine Scheibe  $J_{Z,Scheibe}$  nach:

$$J_{Z,Scheibe} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot R^2 \quad [kg \cdot m^2] \quad (62)$$

Für eine Kreisscheibe berechnet sich das Massenträgheitsmoment wie folgt:

$$J_{Z,Kreisring} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (r^2 + R^2) \quad [kg \cdot m^2] \quad (63)$$

Wie anhand des Vergleiches von (60) und (62) bzw. (63) zu erkennen ist, hat der Radius den größten Einfluss auf das Massenträgheitsmoment, siehe Anhang 10.

## 5.2 Das Flächenträgheitsmoment

Das Flächenträgheitsmoment  $I$  ist ein Maß für die Steifigkeit eines Körpers gegen Biegung. Ist der Querschnitt des zu betrachtenden Objekts ein Kreis oder ein Kreisring, wie im Fall der

Welle und der Scheibe, gibt das Flächenträgheitsmoment auch den Widerstand gegenüber der Torsion des Querschnitts an. Das polare Flächenträgheitsmoment  $I_P$  setzt sich aus den axialen Trägheitsmomenten  $I_X$  und  $I_Z$  zusammen. Für eine Welle errechnet sich  $I_P$  folgendermaßen:

$$I_P = I_Y + I_Z \quad [m^4] \quad (64)$$

$$I_Y = I_Z = \int_0^R r^2 \cdot dA \quad [m^4] \quad (65)$$

$$\text{mit} \quad A_{Kreis} = \pi \cdot r^2 \quad [m^2] \quad (66)$$

$$I_{P,Kreis} = \int_0^R r^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \quad [m^4] \quad (67)$$

$$I_{P,Kreis} = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^R r^3 \cdot dr = \frac{\pi}{2} \cdot R^4 \quad [m^4] \quad (68)$$

$$I_Y + I_Z = \frac{\pi}{4} \cdot R^4 \quad [m^4] \quad (69)$$

Ähnlich wird das Flächenträgheitsmoment für einen Kreisring berechnet, siehe Anhang 10:

$$\text{mit} \quad A_{Kreis} = \frac{\pi}{4} \cdot (R^2 - r^2) \quad [m^2] \quad (70)$$

mit (58)

$$I_Y = I_Z = \frac{\pi}{4} \cdot (R^2 + r^2) = \frac{A}{4} \cdot (R^2 - r^2) \quad [m^4] \quad (71)$$

### 5.3 Wellen- / Scheibenrotordynamik

Bei einer magnetisch gelagerten Welle kommt es aufgrund deren mechanischer Eigenschaften zu Schwingungen. Diese treten vor allem bei der Resonanzdrehzahl  $\Omega_r$  auf. Allgemein gilt für die Resonanzfrequenz einer Welle:

$$\Omega_r = \Omega \cdot \sqrt{\frac{\Theta_{px} \cdot \Theta_{py}}{\Theta_a^2}} \quad [s^{-1}] \quad (72)$$



Dabei entsprechen  $\Theta_a$ ,  $\Theta_{px}$ ,  $\Theta_{py}$ , dem axialen Trägheitsmoment und dem äquatorialen Trägheitsmoment der X-Achse bzw. dem der Y-Achse. Die sogenannte biegekritische Drehzahl lässt sich nach (73) bestimmen.

$$n_{krit} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{f}} \quad [s^{-1}] \quad (73)$$

Dabei entspricht  $g$  der Gewichtskraft der Masse und  $f$  der Durchbiegung durch die jeweilige Gewichtskraft /18/ und es treten unterschiedliche Formen der Biegeschwingungen des Lini-entragwerks auf, siehe Abbildung 31. Es wird zwischen dem „V-Schlag“, dem „S-Schlag“ und dem „Doppel-S-Schlag“ unterschieden. /19/

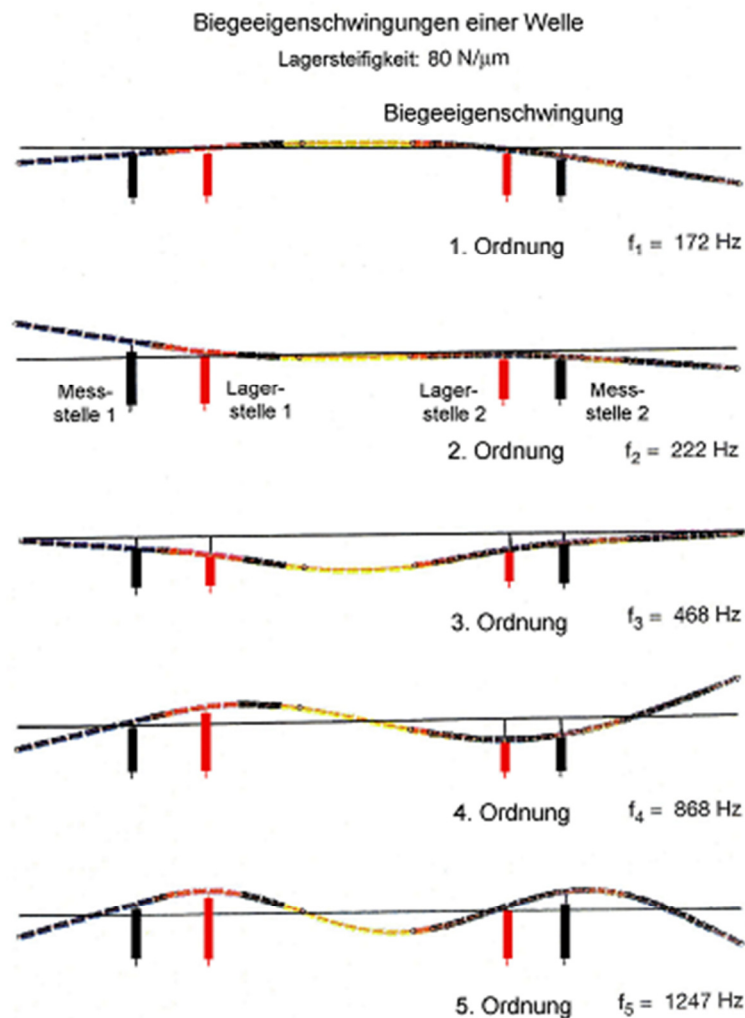


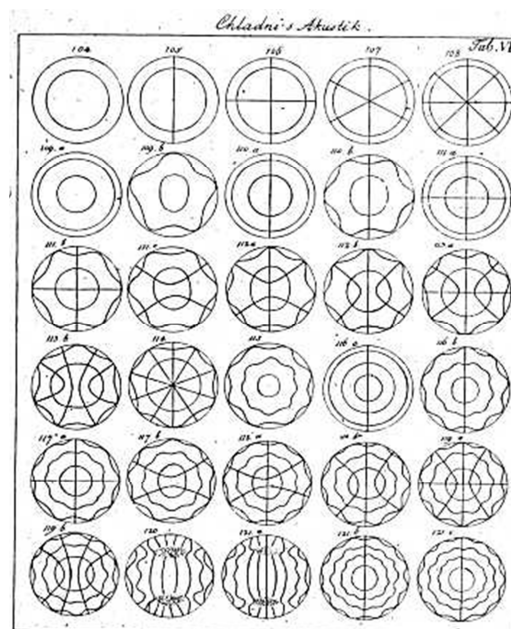
Abbildung 31 – Biegeeigenschwingungen einer Welle bei verschiedenen Drehzahlen /19/

Die Untersuchung des Schwingungsverhaltens einer rotierenden Kreisscheibe bzw. eines Kreisringes gestaltet sich aufgrund der geometrischen Zwangsbedingungen schwieriger, als bei einem Linientragwerk. Zu Beginn wird das statische Verhalten des Kreisrings beschrie-

ben. Zu diesem Zweck wurden in /20/ Untersuchungen mit einer Kreisscheibe durchgeführt. Diese wurde mit einem hochfrequent oszillierenden Magnetfeld beaufschlagt und dadurch im Resonanzfall in Biegeschwingungen versetzt. Unter Verwendung der von Kirschhoff angegebenen Formel für die Grundfrequenz einer freischwingenden Platte  $\omega$  erhält man für eine Kreisplatte mit dem Radius  $R$ , der Dicke  $D$  und dem zugehörigen Elastizitätsmodul  $E$  mit der spezifischen Dichte  $\rho$ :

$$\omega = 0,261 \cdot \frac{D}{R^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [\text{Hz}] \quad (74)$$

Dabei entstehen die von Ernst Florens und Friedrich Chladni 1787 erstmals beschriebenen Klangfiguren, siehe Abbildung 32.

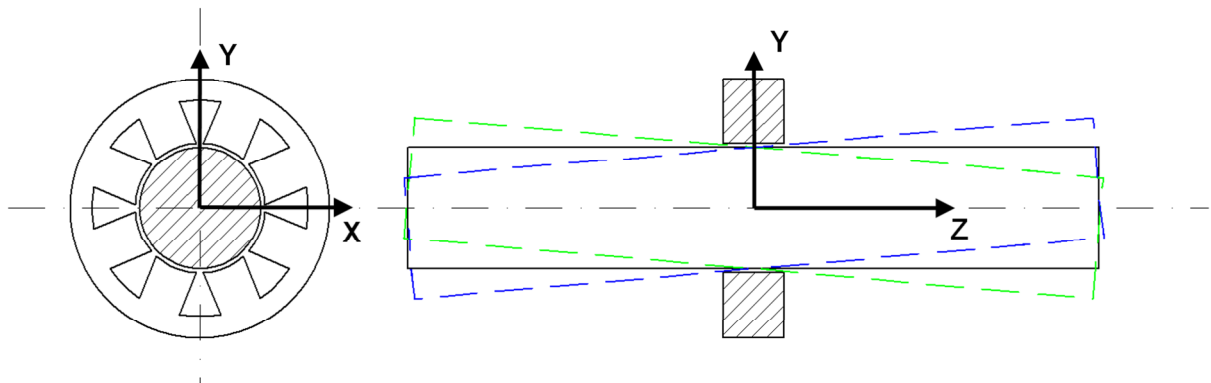


**Abbildung 32 - Chladnische Klangfiguren;  
steigende Frequenz von links oben nach rechts unten**

Wenn die Drehgeschwindigkeit  $\Omega$  einer rotierenden Scheibe sich der Eigenfrequenz nähert oder angleicht, dann wachsen die erzwungenen Schwingungsamplituden. Dieser Umstand gestaltet sich als höchst problematisch, weil so ein Aufschwingen des Läufers begünstigt wird, was wiederum zu einem Kontakt mit dem Fanglager oder sogar zur Beschädigung des gesamten Aufbaus führen kann. Ebenso kommt es zu solchen Schwingungen, wenn die Elektromagneten mit der Resonanzfrequenz angesteuert werden. Im Anhang 10 wurde die Eigenfrequenz für eine Kreisscheibe mit den im Modell verwendeten Maßen berechnet.

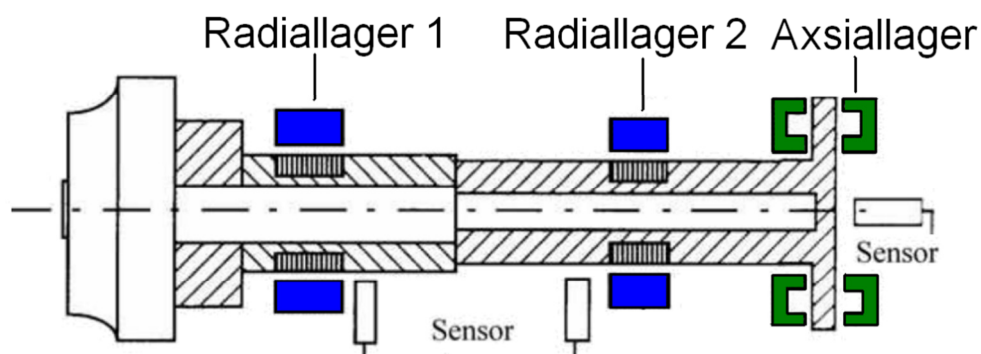
## 5.4 Unterschiede in der Lagerung

Ein einzelnes elektromagnetisches Lager (Abbildung 33) kann maximal zwei Freiheitsgrade binden. Lediglich eine Verschiebung auf der X- und Y-Achse ist zu kontrollieren. Die verbleibenden vier Freiheitsgrade, wie eine Drehung um die X- und Y-Achse und eine Verschiebung auf, sowie eine Drehung um die Z-Achse, können nicht beherrscht werden.



**Abbildung 33 - einfaches Radiallager**

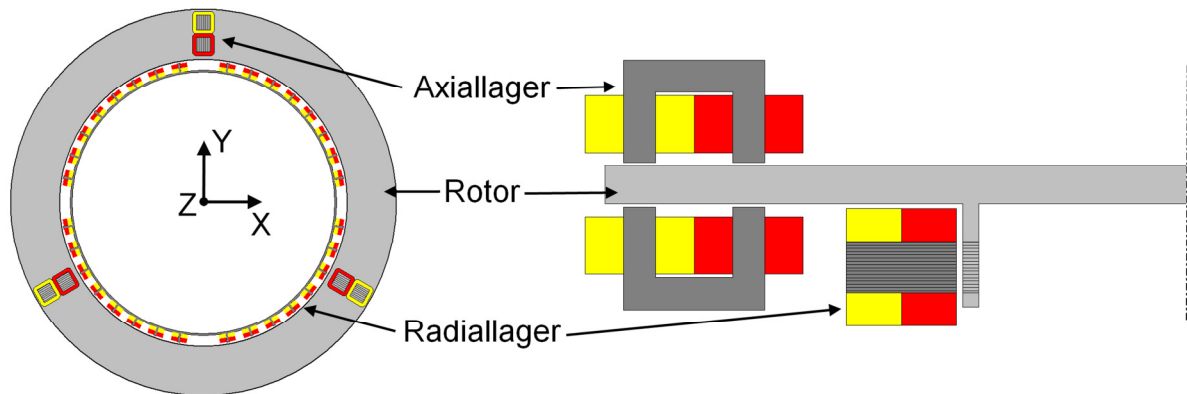
Um eine Drehung um die X- und Y-Achse zu beherrschen, wird mindestens ein zweites Radiallager benötigt. Zu beachten ist außerdem, dass überstehende Wellenenden die Schwingungsfähigkeit des Systems erhöhen. Aus diesem Grund sollten sie so kurz wie möglich gehalten werden. Ist dies nicht möglich, müssen bei der Dimensionierung der Lagerstellen die entstehenden Kräfte mit berücksichtigt werden. Um eine Verschiebung auf der Z-Achse beherrschen zu können, wird ein Axiallager, siehe Abschnitt 3.1.2, benötigt. Der typische Aufbau einer magnetgelagerten Welle ist in Abbildung 34 dargestellt.



**Abbildung 34 - Magnetgelagerte Welle /1/**

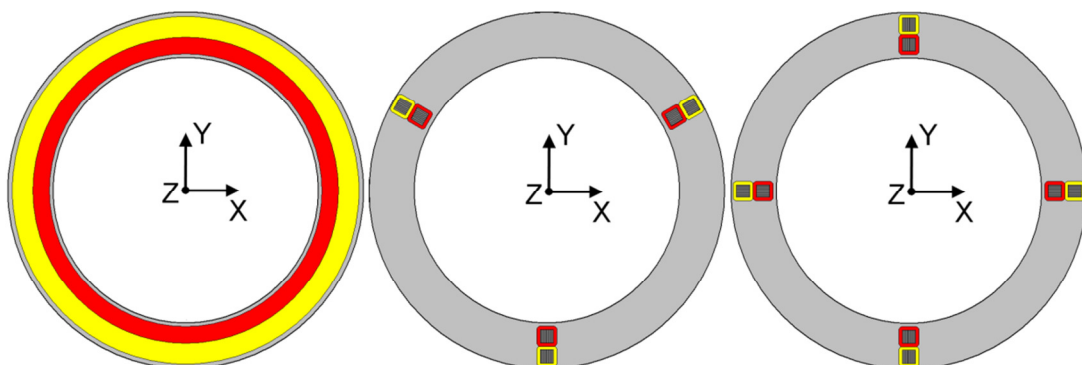
Blau sind in diesem Fall die beiden Radiallagerstellen und grün das Axiallager dargestellt. Um eine Welle magnetisch zu lagern, werden mindestens zwei Radial- und ein Axiallager benötigt. Bei einem vollständig elektromagnetisch gelagerten Kreisring wird auf Grund seiner geringen Dicke nur ein Radial- und ein Axiallager benötigt. Das Radiallager wird wie bei der

Welle am Außenradius angebracht. Allerdings wäre die Radiallagerstelle auch im Innenradius oder über einem Kranz an der Scheibe möglich, siehe Abbildung 35.



**Abbildung 35 - Varianten der Radiallager**

In diesem Bild sind zwei Varianten der aktiven radialen Lagerung dargestellt. Auf dem linken Bild wurde das Radiallager in das Innere des Kreisrings versetzt. Bei dem rechten Bild wurde ein Kranz an den Kreisring angebracht an dem das Radiallager angreift. Das Axiallager eines Kreisringes gestaltet sich komplizierter als das einer Welle. Unter der Annahme, dass durch das Radiallager keinerlei Verschiebung auf der X- und Y- Achse möglich ist, müssen drei weitere Freiheitsgrade beherrscht werden. Diese sind die Drehung um X und Y und die Verschiebung auf Z. Eine Rotation um die Z-Achse bleibt weiterhin ohne Beachtung. In Abbildung 36 sind drei Varianten der axialen Lagerung dargestellt. Bei dem eingezeichneten Bezugskoordinatensystem zeigt die Z-Achse aus der Zeichnungsebene heraus. Wird das Axiallager wie bei einer Welle mit koaxial angeordneten Spulen gestaltet, kann kein Einfluss auf die Verkippung des Ringes um X und Y genommen werden, siehe Abbildung 36 links. Es kann nur ein Freiheitsgrad (Verschiebung auf Z) beherrscht werden. Diese Variante ist also ungeeignet.



**Abbildung 36 - Möglichkeiten der axialen Lagerung**

Mittig ist in Abbildung 36 ein Axiallager mit drei um 120° versetzt angeordneten Lagerstellen abgebildet. Diese Variante erlaubt ein Beherrschen von drei Freiheitsgraden und ist damit

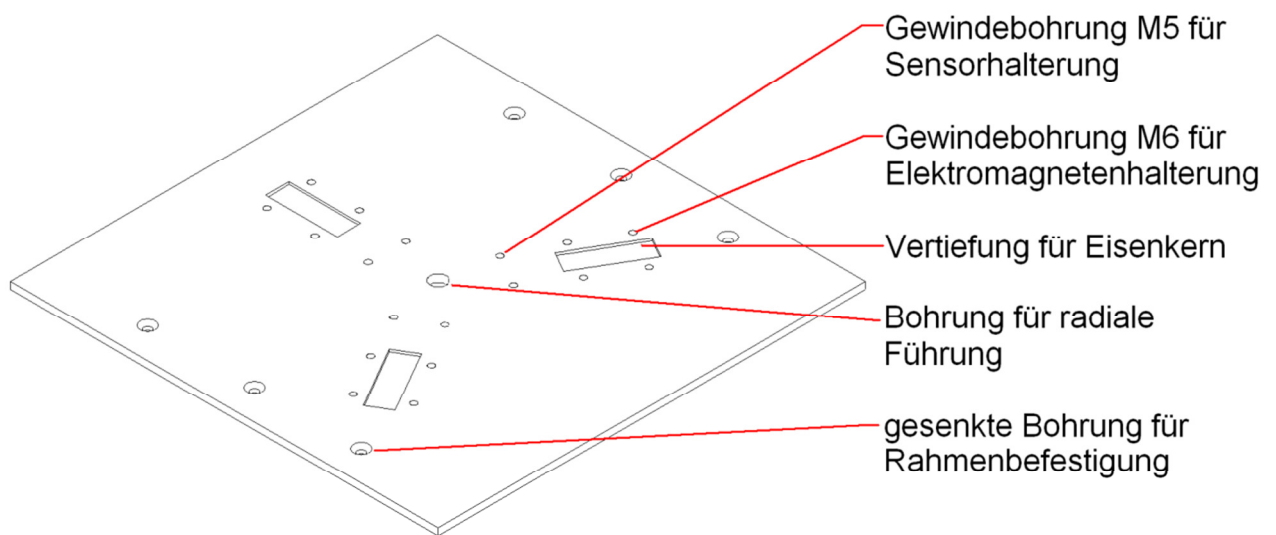
sehr gut als aktive Axiallagervariante geeignet. Zur Positionserfassung werden mindestens drei Lagesensoren benötigt. Für die Lageerfassung eines Objektes im dreidimensionalen Raum werden mindestens drei Punkte benötigt, welche sich nicht in einer Linie befinden sollten, da sonst Redundanz entsteht. Aus diesem Grund werden für die Variante mit vier Elektromagneten, wie rechts abgebildet, auch mindestens drei Positionssensoren benötigt. Allerdings ist das System mit vier Lagerstellen überbestimmt und eignet sich somit weniger als die Variante mit drei Lagerstellen.

## 6 Das Versuchsmodell

Anhand der theoretischen Überlegungen und der mathematischen Auslegungen wurde ein erstes Versuchsmodell angefertigt. Mit dessen Hilfe die Realisierbarkeit der magnetischen Lagerung eines ferromagnetischen scheibenförmigen Läufers untersucht wurde. Das Funktionsmodell besteht aus einer Grund- und einer Deckplatte, welche beide aus Aluminium gefertigt sind. An diesen werden jeweils drei Elektromagnete mit einem Eisenkern in U-Form befestigt. Zwischen den Magneten befindet sich der Rotor, in diesem Fall ein Kreisring aus Eisen, siehe Anhang 11. Ein Rahmen aus Aluminiumprofil soll für die notwendige Stabilität sorgen. Die Positionserfassung des Kreisringes erfolgt über drei Wirbelstromsensoren. Die Lage- und die Stromregelung werden über vorhandene Module realisiert. In den folgenden Abschnitten soll noch einmal präziser auf den Aufbau der einzelnen Modellelemente eingegangen werden.

### 6.1 Die Grund- und Deckplatte des Modells

Die Grund- und die Deckplatte sind in ihrem Aufbau spiegelsymmetrisch. Aus diesem Grund soll nur die Grundplatte (Abbildung 37) näher erläutert werden.



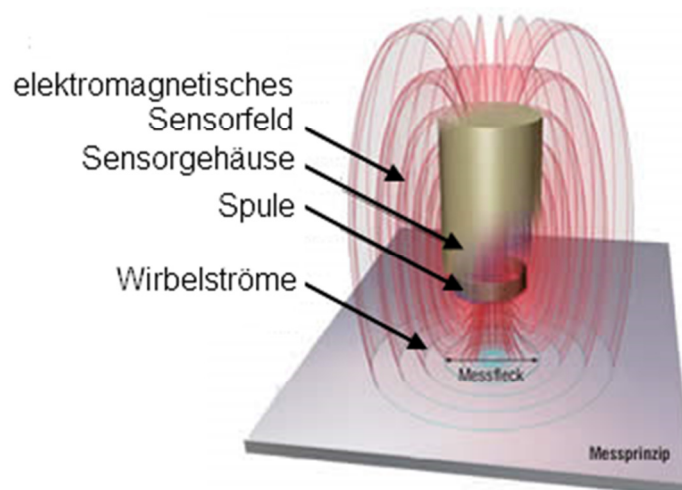
**Abbildung 37 - Die Grundplatte**

Die Grundplatte besteht aus 8mm dickem Aluminium und besitzt die Maße 360mm x 360mm. Um die Elektromagnete definiert zu befestigen und um eine Verschiebung zu unterbinden, wurden in die Grundplatte Vertiefungen eingefräst. Weiterhin werden die Elektromagnete mit Aluminiumwinkeln an der Grundplatte verschraubt. Zusätzlich zu den Halterungen für die

Elektromagnete befinden sich drei weitere Halterungen für die Wirbelstromsensoren auf der Grundplatte, welche nahe dem Innenradius der jeweiligen Magnetlagerstelle angebracht sind. Da zur Lagebestimmung drei Sensoren ausreichend sind, wurden an der Deckplatte lediglich die Gewindebohrungen vorbereitet. Der Rahmen aus Aluminiumprofil wird an zwei Seiten auf der Grundplatte befestigt. Da nur die axiale elektromagnetische Lagerung erprobt werden soll, wird die radiale Lagerung durch einen Kunststoffzylinder in der Mitte des Kreistrings realisiert. Dieser wird mittig an der Grund- und Deckplatte verschraubt und sorgt zusätzlich für eine Stabilisierung. Eine bemaßte Zeichnung befindet sich im Anhang 12.

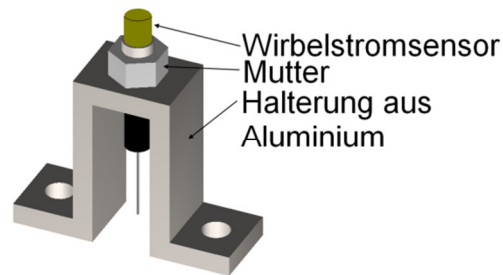
## 6.2 Die Wirbelstromsensoren mit Halterung

Die Erfassung der Position in der Z-Ebene wird über Wirbelstromsensoren realisiert. Im Kopf des Wirbelstromsensors ist eine Spule integriert, welche mit hochfrequentem Wechselstrom gespeist wird, siehe Abbildung 38. Das dabei entstehende magnetische Feld tritt aus dem Sensorkopf aus und induziert im (elektrisch leitfähigen) Rotor Wirbelströme. Diese rufen wiederum ein magnetisches Feld hervor, was der Lenz'schen Regel nach seiner Ursache entgegenwirkt, wodurch die Spulenimpedanz verändert wird. Je näher sich das Objekt der Sensorfläche nähert, desto mehr steigen die Wirbelstromverluste an. Die Impedanzänderung wird durch die Auswerteelektronik erfasst und in ein analoges Spannungssignal gewandelt. Dabei bilden die Wirbelstromsensoren einen streng linearen Messbereich aus. /23/



**Abbildung 38 - Messprinzip Wirbelstromsensor /23/**

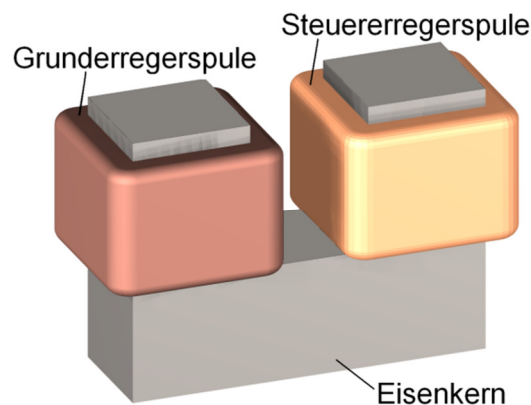
Um den Wirbelstromsensor nahe genug an den Rotor zu bringen, wird eine entsprechende Halterung benötigt, siehe Abbildung 39. Diese Halterung besteht aus gefrästem Aluminium und bietet die Möglichkeit den Sensor optimal einzurichten, siehe Anhang 13.



**Abbildung 39 - Die Halterung mit Wirbelstromsensor**

### 6.3 Die Elektromagnete

Die Elektromagnete sind der Hauptbestandteil des Modells. Der Kern der Magnete besteht aus U-förmigen Blechstreifen. Für einen Elektromagneten werden 40 dieser 0,5mm dicken Blechschnitte benötigt, siehe Anhang 14. Daraus ergibt sich eine quadratische Grundfläche von  $400\text{mm}^2$  pro Zahn. Auf den Zähnen befinden sich je eine Spule: eine Steuererregerspule und eine Spule für die Grunderregung des magnetischen Felds, siehe Abbildung 40.



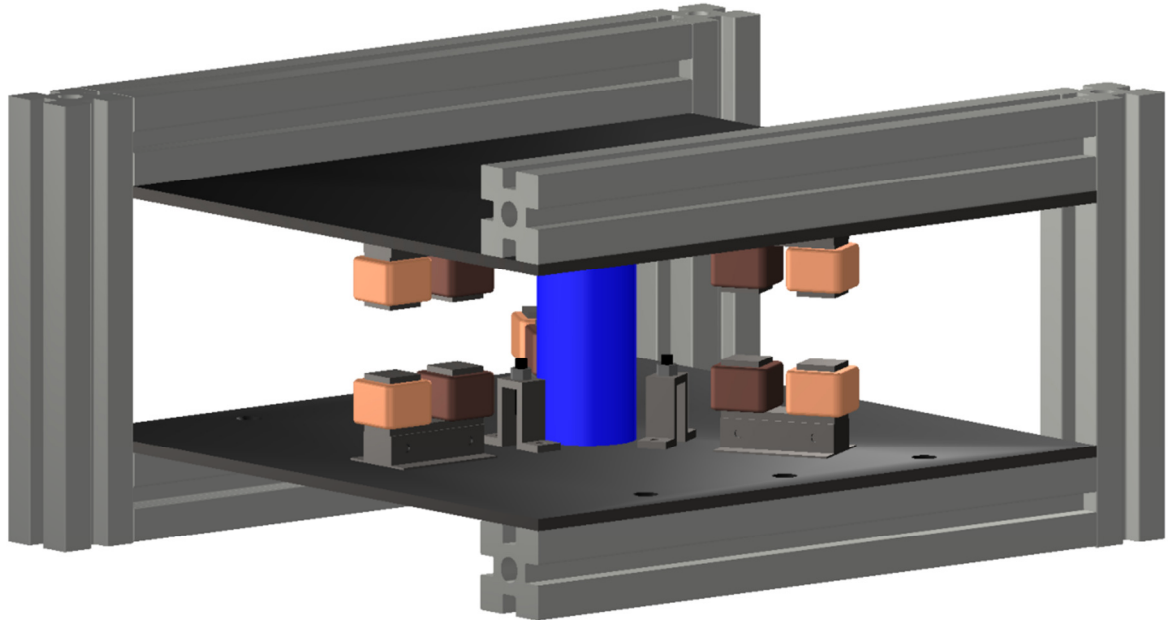
**Abbildung 40 - Elektromagnet**

Es wurden sechs Spulen für die Steuererregung und sechs für die Grunderregung gewickelt. Die Eisenkerne wurden an den Zähnen mit glasfaserverstärktem Klebeband umwickelt. Dieses verhindert, dass es bei dem Aufschieben der Spulen zu Beschädigungen des Schutzlacks am Kupferdraht kommt. Wie aus /24/ S. 773-775 hervor geht, treten Hochspannungssprühentladungen nur an Spitzen und scharfen Kanten auf. Das Klebeband dient hier zusätzlich als Isolierung. Die Elektromagnete wurden mit Winkeln (Anhang 15) auf die Grund- bzw. die Deckplatte geschraubt. Als Fanglager dienen in diesem Fall kleine Kunststoffplättchen. Diese werden auf den Stirnseiten der Eisenkerne befestigt. Dadurch wird verhindert, dass der Kreisring direkt die Eisenkerne berührt. In diesem Fall, würde der Rotor am Eisenkern „kleben“. Alle sechs Grunderregerspulen sind in Reihe geschaltet, so dass sie von demselben Strom durchflossen werden. Damit baut sich in den Spulen ein



gleichstarkes Magnetfeld auf. Die Steuererregerspulen der einzelnen Lagerstellen sind ebenfalls in Reihe geschaltet, hier ist der gegensätzliche Wicklungssinn zu beachten.

Das zusammengebaute Modell ist in Abbildung 41 dargestellt. Allerdings wurden in diesem Bild die vordere Strebe und der Läufer aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen.

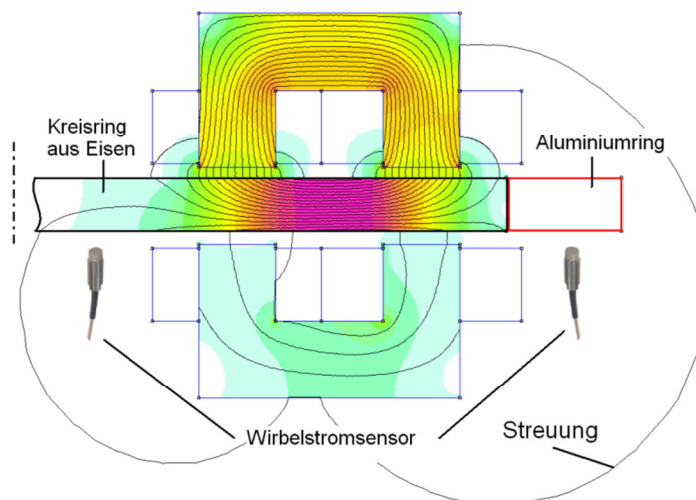


**Abbildung 41 - Das Funktionsmodell**

Die drei Elektromagnete der Grundplatte stehen denen der Deckplatte gegenüber. Mittig befindet sich ein Kunststoffzylinder (blau), welcher die radiale Lagerung übernimmt. Zwischen den Magnetlagern und dem Kunststoffzylinder sind die Wirbelstromsensoren mit ihren Halterungen dargestellt. Die Grund- und die Deckplatte werden durch einen Rahmen aus Aluminiumprofil auf Abstand gehalten.

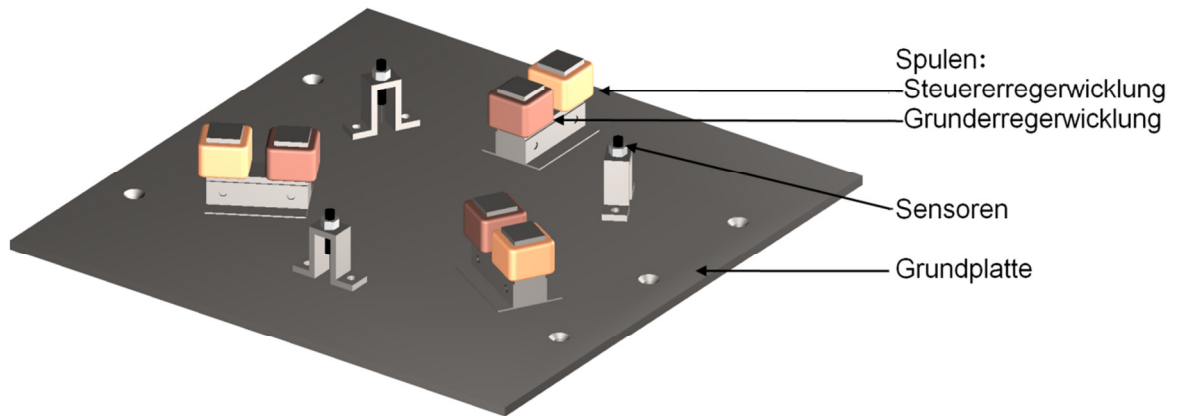
## 7 Inbetriebnahme und Ergebnisse

Bei der Inbetriebnahme des Versuchsmodells stellte sich heraus, dass die 8mm starke Grund- und Deckplatte widererwartend nicht die nötige Steifigkeit aufwiesen. Dies äußerte sich dadurch, dass sich die Platten durchbogen und die Elektromagneten auf beiden Seiten des Kreisringes auflagen. Um dies zu unterbinden wurden vier Gewindestangen abstützend montiert. Mit Hilfe von Oszilloskopen wurden die normierten Signale der Lagesensoren dargestellt. Dabei zeigte sich, dass die Wirbelstromsensoren durch das Magnetfeld der Grund-erregung stark beeinflusst wurden. Das Magnetfeld breitete sich im ferromagnetischen Kreisring aus und wurde von den Wirbelstromsensoren detektiert. Um das zu unterbinden, musste auf den Außenradius des Kreisringes eine Messspur aus Aluminium aufgeschrupft werden. Im paramagnetischen Aluminium breitet sich der magnetische Fluss, wie in 2.3.2 beschrieben, nicht aus und so kommt es nur zu einer geringen Beeinflussung der Wirbelstromsensoren. Dies ist anhand des geringen Rauschens auf dem Oszilloskop zu erkennen und ist auf die Streuung der Elektromagnete zurückzuführen. Die Auswirkungen des aufgeschrupften Aluminiumringes wurden in Abbildung 42 simuliert.



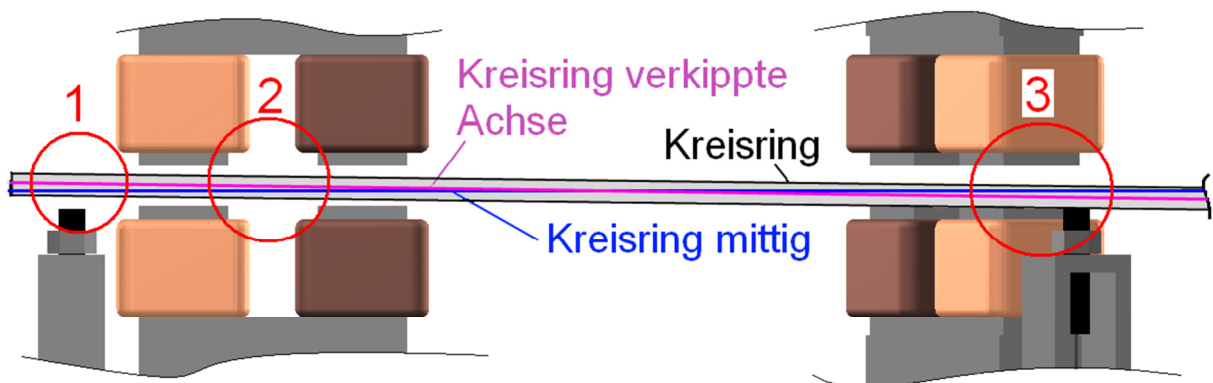
**Abbildung 42 - Simulation mit Messspurring**

In der Abbildung 42 ist der Kreisring aus Eisen schwarz umrandet. Der rot umrandete Bereich auf der rechten Seite stellt den Aluminiumring dar. Es ist deutlich zu sehen, dass der linke Wirbelstromsensor auf dem vom Magnetfeld durchflossenen Bereich misst, während der rechte Sensor auf der unbeeinflussten Messspur aus Aluminium misst. Um eine Messung auf der Messspur zu realisieren, mussten die Sensoren nach außen verlagert werden. Alternativ dazu könnten die Wirbelstromsensoren um  $180^\circ$  versetzt angebracht werden. Dies hätte den großen Vorteil, dass das Aufschrupfen der Messspur entfällt und sich die Sensoren in einem großen Abstand zu den Elektromagneten befinden, siehe Abbildung 43.



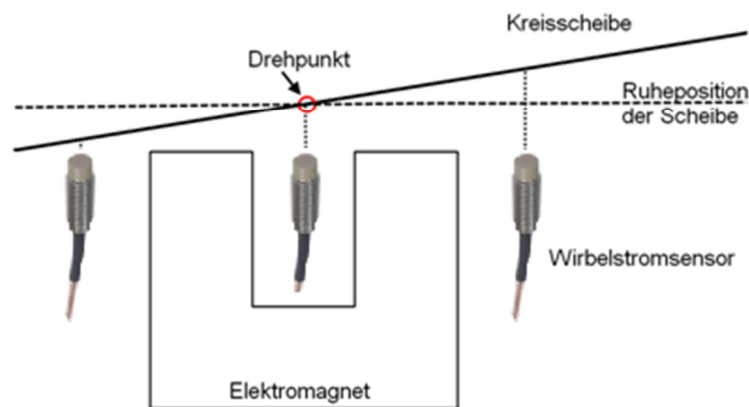
**Abbildung 43 - Grundplatte mit versetzten Sensoren**

Durch den Versatz der Wirbelstromsensoren würde sich deren Beeinträchtigung durch die Streufelder erheblich verringern. Durch das Anpassen der Reglerparameter wurde zunächst versucht den Kreisring in jeder der drei Lagerstellen einzeln schweben zu lassen. Das war auch ohne größere Schwierigkeiten möglich. Bei dem Versuch den Ring in zwei Lagerstellen gleichzeitig schweben zu lassen, zeigte sich die starke mechanische Abhängigkeit der Messstellen. Wenn der Kreisring in einer Lagerstelle schwebt und ein zweites Lager angesteuert wird, kommt es durch die Bewegung des Ringes dazu, dass die erste Lagerstelle instabil wird. Aus diesem Grund muss der Lageregler versuchen dem entgegen zu wirken. Dieses Entgegenwirken führt wiederum zu einer verstärkten Bewegung oder sogar bis hin zum Aufschwingen der beiden Lagerstellen. So entstehen die starken Schwingungen, welche in Abschnitt 5.3 beschrieben wurden. Diese Schwingungen sind so heftig, dass es zu einer erheblichen Lärmbelastung kommt und die gesamte Konstruktion mit samt dem Tisch in starke Vibrationen versetzt wird. Diese mechanische Abhängigkeit entsteht, auf Grund der Lagemessung außerhalb der Lagerstelle. Dabei spielt es keine Rolle, ob sich die Messstelle auf dem Innenradius, wie zu Beginn, oder sich auf dem Außenradius befindet. Die Auswirkungen werden in Abbildung 44 verdeutlicht.



**Abbildung 44 - Verkipfung des Kreisringes**

Wird der Kreisring auf einer Seite angehoben, so senkt er sich auf der anderen Seite und umgedreht. In dieser Zeichnung ist der Kreisring mit den Axiallagern dargestellt. Blau ist die Mittellinie des Ringes im Schwebezustand (optimal) dargestellt. Die Mittellinie bei der Verkipfung (real) ist pink eingezeichnet. In der Markierung 2 befindet sich die Scheibe genau mittig zwischen den Elektromagneten. Dadurch, dass sich die Wirbelstromsensoren außerhalb der Lager befinden, wird der Ring als zu weit oben angenommen, wie in der Markierung 1 dargestellt. Das führt dazu, dass die Regelung den Ring absenkt. In der Markierung 3 liegt der Ring in den unteren Fanglagern. Der Lageregler versucht dies auszugleichen und hebt den Kreisring an. Das hat zur Folge, dass der Wirbelstromsensor in Markierung 1 einen zu geringen Abstand misst und der Lageregler die Position korrigieren will. Die aktuelle Position des Ringes in der Axiallagerstelle kann nicht festgestellt werden. Die optimale Lösung für dieses Problem wäre, die Lagemessung direkt in der Lagerstelle, also zwischen den beiden Zähnen des Eisenkerns. An dieser Position befindet sich der Drehpunkt des Kreisscheibes, siehe Abbildung 45.



**Abbildung 45 - Optimale Messposition**

In dieser schematischen Darstellung werden die eben beschriebenen Fälle aufgezeigt. Der linke Wirbelstromsensor befindet sich am Außenradius und der rechte Wirbelstromsensor nahe des Innenradius des Kreisringes. Der mittlere Sensor misst genau auf dem Drehpunkt und somit ohne eine Beeinträchtigung durch die Verkipfung. Allerdings wird der Wirbelstromsensor an dieser Stelle so stark durch das magnetische Feld der Elektromagneten beeinflusst, dass diese Variante keinen praktischen Nutzen besitzt. Eine stabile elektromagnetische Lagerung ist mit der vorhandenen Regelung und dem Versuchsaufbau nicht realisierbar. Es stellt sich die Frage: Wie kann die mechanische Abhängigkeit der Kreisscheibe bei einer Bewegung gelöst werden? Als Möglichkeit bleibt nur eine Entkopplung der Abhängigkeiten. Ähnliche Abhängigkeiten bestehen auch bei der Regelung einer elektrischen Maschine. Der Stator besteht, vereinfacht ausgedrückt, aus drei Spulen. Diese ergeben ein Statorkoordinatensystem mit drei um  $120^\circ$  versetzten Achsen. Dieses Koordinatensystem

wird mit Hilfe von einem rotierenden Raumzeiger in das Rotorkoordinatensystem überführt. Das so entstandene Koordinatensystem besteht nur aus zwei rechtwinklig aufeinander stehenden Achsen. Diese Überführung oder Transformation wird mit einem Koordinatenwandler nach Park durchgeführt. Da sich die Abhängigkeiten im Fall der Lagerung des Kreisringes und der Regelung einer elektrischen Maschine ähneln, wird im Folgenden untersucht, ob eine Park-Transformation zielführend ist.

## 7.1 Die Park-Transformation

Betrachtet man den Kreisring als starren Körper, so werden bei einer Verkipfung alle drei durch die Positionsmessgeber gelieferten Ausgangssignale  $S_1$ ,  $S_2$  und  $S_3$  beeinflusst. Um diese Abhängigkeit zu lösen, müssen die Ausgangssignale mit Hilfe eines Messsignal-Koordinaten-Wandlers in drei unabhängige Messkoordinaten transformiert werden. Zu diesem Zweck wird ein X-Y-Koordinatensystem eingeführt, siehe Abbildung 46.

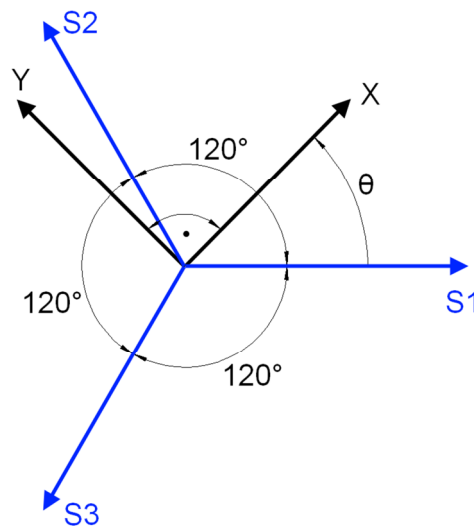


Abbildung 46 - Koordinatensystem der Park-Transformation

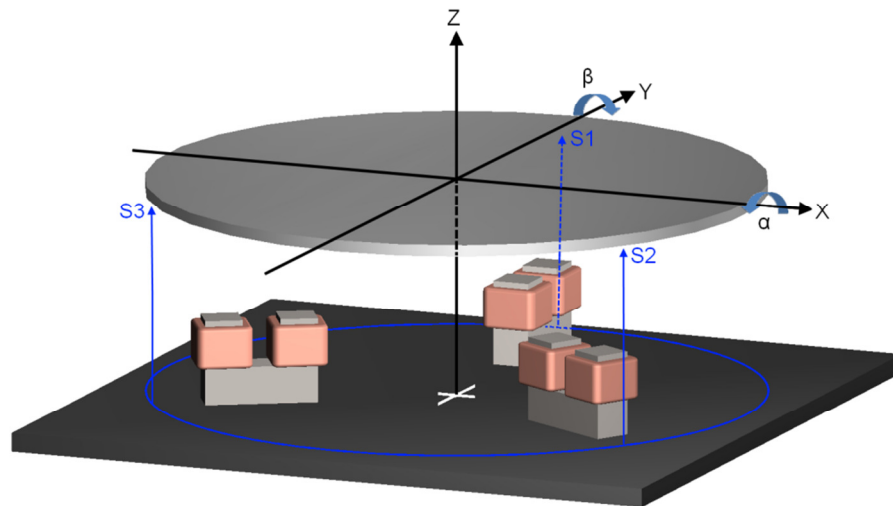
Da die Parktransformation ursprünglich für die Drehfeldregelung von elektrischen Maschinen entwickelt wurde, dreht sich das X-Y-Koordinatensystem in Abhängigkeit der Zeit um die Z-Achse. Die Hintransformation der Park-Transformation ist folgendermaßen definiert [25]:

$$P = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (75)$$

Die Rücktransformation ergibt sich nach /25/:

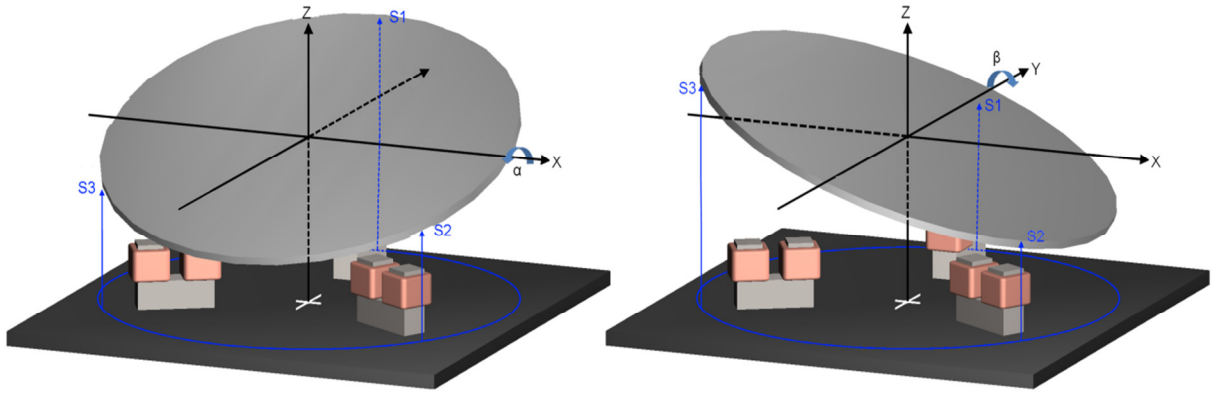
$$P^{-1} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{pmatrix} \quad (76)$$

Da die Magnetlager im vorliegenden Fall statisch angeordnet sind und kein Drehfeld benötigt wird, lässt sich das X-Y-Koordinatensystem frei festlegen. Um Rechenaufwand zu verringern, wird das Koordinatensystem so eingezeichnet, dass die Y-Achse auf der Lagerstelle  $S_1$  liegt. Dadurch wird die Abhängigkeit des Messsignals bei der Drehung um diese Achse zu Null. Somit ergibt sich für das Modell ein neues Koordinatensystem, wie es in Abbildung 47 zu sehen ist.



**Abbildung 47 - Messsignal-Koordinaten-Beziehung**

Der Winkel  $\alpha$  gibt die Rotation um die X-Achse und der Winkel  $\beta$  die Rotation um die Y-Achse an. Eine Verschiebung auf den beiden Achsen muss nicht berücksichtigt werden, da der Kreisring radial fixiert ist. Ebenso kann eine Drehung um die Z-Achse vernachlässigt werden, da diese für die Lagerung nicht von Bedeutung ist. Die Verschiebung auf der Z-Achse hingegen muss beschrieben werden. Die Messsignale der drei Wirbelstromsensoren werden in diesem Fall mit  $S_1$  bis  $S_3$  bezeichnet. Wird der Kreisring um die X- bzw. die Y-Achse gedreht, wie in Abbildung 48 dargestellt, ergeben sich folgende Abhängigkeiten.



**Abbildung 48 - Drehung um die X-Achse (links) und um die Y-Achse (rechts)**

Es ist zu erkennen, dass bei einer Rotation um die X-Achse die Lagerstellen  $S_2$  und  $S_3$  mit demselben negativen Betrag und die Lagerstelle  $S_1$  mit einem positiven Betrag beaufschlagt werden. Bei einer Verkippung um die Y-Achse wird der Abstand zur Messstelle  $S_1$  überhaupt nicht verändert, da sich die Drehachse genau auf der Messstelle befindet. Die Lagerstellen  $S_2$  und  $S_3$  werden mit demselben Betrag, allerdings mit unterschiedlicher Richtung, beaufschlagt. Bei einer Drehung um die X-Achse ergeben sich, nach Park, für  $S_\alpha$  folgende Winkelbeziehungen:

$$S_\alpha = \cos(0^\circ) \cdot S_1 + \cos(120^\circ) \cdot S_2 + \cos(-120^\circ) \cdot S_3 \quad (77)$$

$$S_\alpha = S_1 - \frac{S_2}{2} - \frac{S_3}{2} \quad (78)$$

$S_\alpha$  ist eine dimensionslose Größe, die bei einer Drehung um die X-Achse, nach der Park-Transformation, vom Lagereger auf Null geregelt wird. Für eine Drehung um die Y-Achse ergeben sich die Beziehungen für  $S_\beta$ :

$$S_\beta = \sin(0^\circ) \cdot S_1 + \sin(120^\circ) \cdot S_2 + \sin(-120^\circ) \cdot S_3 \quad (79)$$

$$S_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot S_2 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot S_3 \quad (80)$$

Da bei einer Verschiebung der Z-Achse alle drei Lagerstellen gleichmäßig beaufschlagt werden ergibt sich:

$$Z = \frac{S_1}{3} + \frac{S_2}{3} + \frac{S_3}{3} \quad (81)$$

In Matrizenschreibweise und mit dem Optimierungsfaktor von  $\frac{2}{3}$  multipliziert, ergibt sich für die Hintransformation folgender Ausdruck /25/:

$$\begin{pmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \\ Z \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (82)$$

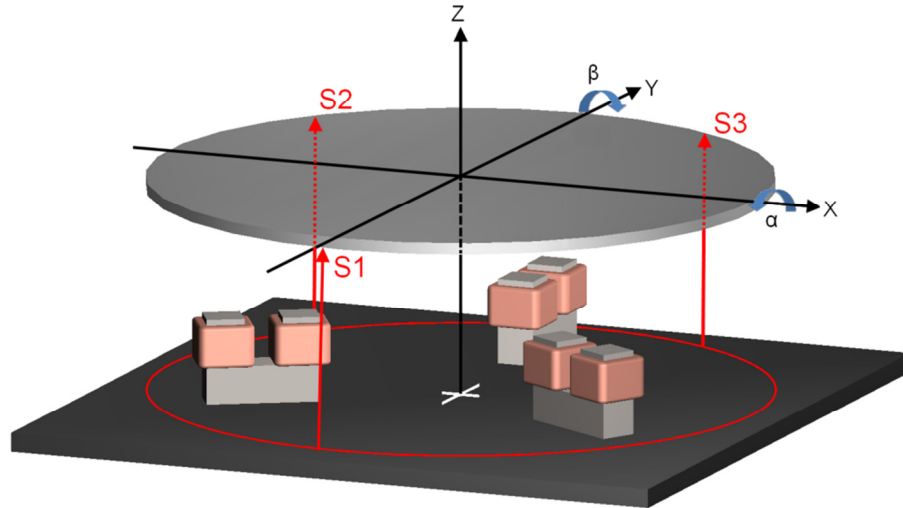
Damit können die Lagerstellen bei einer Drehung um die X- und Y-Achse und bei einer Verschiebung auf der Z-Achse vollständig beschrieben werden. Das neu entstandene Koordinatensystem dient zur Entkopplung der mechanischen Abhängigkeiten. Die transformierten Signale müssen, nach ihrer Verarbeitung im Lageregler, zur Ansteuerung der einzelnen Lagerstellen wieder zurück transformiert werden. Dabei werden  $S_\alpha$  und  $S_\beta$  und die Verschiebung auf Z wieder in die ursprünglichen drei Signale zerlegt. Nach der Rücktransformation werden die Signale  $M_1$ ,  $M_2$  und  $M_3$  genannt. Die Rücktransformation ergibt sich zu /25/:

$$\begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \\ Z \end{pmatrix} \quad (83)$$

Die zu Beginn des Kapitels beschriebenen Probleme durch die außen angebrachten Wirbelstromsensoren treten nun nicht mehr auf. Durch die Park-Transformation wird eine Verkipfung des Kreisringes bzw. des neu entstandenen XY-Koordinatensystems geregelt und die Position des Kreisringes in jeder Lagerstelle einzeln. Die Positionierung des Ringes in Z-Richtung wird auch über das XY-Koordinatensystem gelöst. Bei einer Verschiebung in Z-Richtung werden alle drei Lagerstellen mit demselben Strom beaufschlagt, was zu einer gleichmäßigen Anhebung bzw. Absenkung führt.

Werden die Wirbelstromsensoren um  $180^\circ$  versetzt, um damit die Beeinflussung durch die Elektromagneten zu verhindern, so hat das auch Konsequenzen auf die Transformation. Die Verschiebung der Sensoren ist in Abbildung 49 dargestellt.





**Abbildung 49 - Messsignal-Koordinaten-Beziehung mit versetzten Sensoren**

Es ergeben sich für  $S_\alpha$  und  $S_\beta$  neue Winkelbeziehungen, welche bei der Transformation berücksichtigt werden müssen. Die Z-Achse bleibt davon unberührt.

$$S_\alpha = \cos(180^\circ) \cdot S_1 + \cos(-60^\circ) \cdot S_2 + \cos(60^\circ) \cdot S_3 \quad (84)$$

$$S_\beta = \sin(180^\circ) \cdot S_1 + \sin(-60^\circ) \cdot S_2 + \sin(60^\circ) \cdot S_3 \quad (85)$$

In Matrizenschreibweise ergibt sich daraus für die Hintransformation:

$$\begin{pmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \\ Z \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (86)$$

und für die Rücktransformation:

$$\begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \\ Z \end{pmatrix} \quad (87)$$

Es ist zu erkennen, dass lediglich die Vorzeichen von  $S_1$  und  $S_2$  bzw. von  $S_\alpha$  und  $S_\beta$  geändert werden müssen, um die Verschiebung der Sensoren in der Park-Transformation zu berücksichtigen. Durch den zeitlichen und konstruktiven Aufwand, wurde eine Verschiebung der Wirbelstromsensoren im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Nachdem die Park-Transformation theoretisch beschrieben wurde, muss sie konstruktiv umgesetzt werden. Dies

geschieht mit Hilfe von analogen Bauelementen, wie Operationsverstärkern (OPV), Widerständen und Kondensatoren. Zunächst wurde die Transformation in einem SPICE Programm (TINA-TI von Texas Instruments) simuliert. Für die Hintransformation ergibt sich eine OPV-Schaltung wie sie in Anhang 16 dargestellt ist. Die Signale von den Wirbelstromsensoren werden mit Hilfe einer Messwertaußereitungsplatine normiert und anschließend mit der Park-Transformation transformiert. Rot umrandet sind die Eingangssignale  $S_1$ ,  $S_2$  und  $S_3$  dargestellt. Diese werden in den nachfolgenden Operationsverstärkern verarbeitet und als Ausgangssignale, hier blau umrandet, als  $S_\alpha$ ,  $S_\beta$  und  $Z$  ausgegeben. Anschließend werden die Signale im Lagereger behandelt. Danach werden sie zurück transformiert. Dazu wird eine OPV-Schaltung, wie in Anhang 17 dargestellt, verwendet. Die Werte für jedes Magnetlager werden nun mit  $M_1$  bis  $M_3$  bezeichnet und von den einzelnen Stromrichtern verstärkt. Damit wird an jedem Elektromagneten die nötige Durchflutung eingestellt. Um den Kreisring in den Schwebezustand zu versetzen, wird zuerst die Drehung um die X- und um die Y-Achse geregelt. Daraus ergibt sich, dass der Kreisring waagrecht entweder in den unteren oder in den oberen Fanglagern liegt. Anschließend wird die Verschiebung auf der Z-Achse geregelt und der Kreisring schwebt berührungslos mit einem Luftspalt von 0,25mm zum oberen und unteren Fanglager. Mit Hilfe von drei Oszilloskopen wurden die Ausgangssignale des Lage-reglers überwacht. Dadurch konnte ein leichtes Schwingen des Kreisrings frühzeitig erkannt und entsprechend darauf reagiert werden. Somit ist bewiesen, dass die Anwendung der Park-Transformation in diesem Fall sinnvoll und notwendig ist, um einen Kreisring mit drei axialen Magnetlagerstellen schweben zu lassen. Es treten trotzdem weiterhin Schwingungen der Scheibe auf. Diese sind durch die konstruktiven Eigenschaften, wie z.B. die Dicke des Kreisringes begründet. Durch die Anfertigung eines dickeren Kreisringes mit einer entsprechend höheren Eigenfrequenz, siehe Abschnitt 5.3, sollten diese Schwingungen vollständig gedämpft werden.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Möglichkeit untersucht eine Scheibe bzw. einen Kreisring magnetisch zu lagern. Dabei wurden verschiedene Varianten der axialen und radialen Lagerung aufgezeigt und auf deren Realisierbarkeit hin untersucht. Es wurden grundlegende Unterschiede zwischen der magnetischen Lagerung einer Scheibe und der einer Welle aufgezeigt. Dabei zeigte sich, dass für die stabile Lagerung eines Kreisringes lediglich ein Radial- und ein Axiallager notwendig ist. Anders als bei einer Welle, bei der für eine stabile magnetische Lagerung mindestens zwei Radiallager und ein Axiallager benötigt werden. Weiterhin wurde auf verschiedenen Möglichkeiten der radialen und der axialen magnetischen Lagerung eines Kreisringes eingegangen. Dafür wurden verschiedene Möglichkeiten der aktiven und der passiven magnetischen Lagerung in axialer und auch in radialer Richtung aufgezeigt. Dabei stellte sich heraus, dass eine vollständige Lagerung mit Elektromagneten zwar nicht die wirtschaftlichste, aber die vielseitigste Variante ist. Die höheren Betriebskosten stehen der flexiblen Regelbarkeit in axialer und radialer Richtung gegenüber. Das bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten für die praktische Anwendung eines Magnetlagers mit scheibenförmigem Läufer.

Für die praktische Umsetzung der magnetischen Lagerung des Kreisringes wurden ein permanentmagnetisches Radiallager und ein elektromagnetisches Axiallager dimensioniert. Es wurde ein Versuchsmodell zur Lagerung eines Kreisringes entworfen und mit einem aktiven Axiallager angefertigt. In der Praxis zeigte sich, dass die zur Lagebestimmung verwendeten Wirbelstromsensoren sehr stark von der elektromagnetischen Streuung der Axiallager beeinflusst werden. Dadurch mussten folgende konstruktive Veränderungen an dem Modell und an dem Kreisring vorgenommen werden. Die Wirbelstromsensoren wurden nach außen versetzt und auf den Kreisring wurde ein Aluminiumring aufgeschraubt. Dies wurde notwendig, da die Wirbelstromsensoren durch die Streufelder der Elektromagneten zu stark beeinflusst wurden. In der paramagnetischen Messspur aus Aluminium breiten sich keine Magnetfelder aus, welche die Sensoren beeinflussen. Bei der Inbetriebnahme des Modells stellte sich heraus, dass die mechanische Abhängigkeit der drei unabhängig voneinander geregelten Axiallagerstellen zu groß ist, um den Kreisring stabil zu lagern. Da die Lageerfassung des Kreisringes außerhalb des Drehpunktes stattfindet, treten ständig Messfehler auf. Dadurch ist eine genaue Lageerfassung und damit eine stabile Lageregelung des Ringes nicht möglich. Dieser Umstand machte es zwingend erforderlich diese Abhängigkeit aufzulösen. Zu diesem Zweck wurden die drei Lagesignale über eine Park-Transformation verknüpft. Mit Hilfe des so entstandenen neuen XY - Koordinatensystem konnte der Kreisring als eine Einheit betrachtet und geregelt werden. Dabei wurde eine Drehung um die jeweilige Achse und

damit eine Änderung in mehreren Lagerstellen gleichzeitig berücksichtigt. Anschließend wurden die Signale über eine Rücktransformation wieder getrennt und konnten separat verstärkt sowie auf den entsprechenden Elektromagnet verteilt werden.

Zukünftig könnte die permanentmagnetische radiale Lagerung noch am Versuchsmodell eingefügt werden, eine entsprechende Aussparung ist bereits an dem Kreisring vorhanden. Ebenso könnten die Auswirkungen eines dickeren Kreisringes und/oder eines größeren Luftspaltes untersucht werden, um die Lagerung eines scheibenförmigen Läufers näher zu untersuchen. Die Auswahl und die Umsetzung eines geeigneten Antriebs für den Kreisring stellt auch eine anspruchsvolle Aufgabe dar und wäre somit gut für eine fortführende Arbeit geeignet.

Abschließend lässt sich sagen, dass die magnetische Lagerung eines ferromagnetischen Läufers sich nur in einigen Punkten zu der magnetischen Lagerung einer Welle unterscheidet.

## Literaturverzeichnis

- /1/ EAAT GmbH:  
Magnetische Lager Aufbau, Wirkungsweise und Einsatzerfahrungen.  
Chemnitz: Firmenschrift
- /2/ Budig, Peter-Klaus:  
Magnetische Lager – Neue Bauelemente der Präzisionstechnik.  
In: Tagungsband 4. Workshop Magnetlagertechnik Kassel-Zittau: Institut für Elektrische Energietechnik (IEE) Elektrische Maschinen, Universität Kassel, 1999
- /3/ Paditz, Marcus:  
Vergleich von Magnetlagern in homopolarer und heteropolarer Bauweise hinsichtlich der Rotorverluste sowie Untersuchungen der Induktionsverteilung speziell bei Homopolarlagern. - 2007. - 102 S.  
Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Elektrotechnik und Informationstechnik, Diplomarbeit, 2008
- /4/ Schnabel, Patrick: Elektronik-Fibel. - 2. Aufl. Ludwigsburg: Books on Demand GmbH Nordstedt, 2003
- /5/ Fischer, Hans; Hofmann, Hansgeorg; Spindler, Jürgen: Werkstoffe in der Elektrotechnik. - 5. Aufl. München: Hanser, 2003
- /6/ Academic dictionaries and encyclopedias <support@academic.ru>:  
Earnshaw-Theorem. Url: <<http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/367058>>, verfügbar am 18.06.2010
- /7/ Chmela, Harald <harald.chmela@mail.htl-hl.ac.at>:  
Diamagnetische Levitation. URL:<<http://www.hcrs.at/DIAMAG.HTM>>, verfügbar am 18.06.2010
- /8/ Heck, Carl:  
Magnetische Werkstoffe und ihre technische Anwendung. - 2. überarbeitete Aufl. Heidelberg: Hüthig, 1975
- /9/ Caspari, Christoph. <fehlerxb@ccinfo.de>:  
Magnete - die geheimnisvolle Kraft? URL:  
<<http://www.elektronikinfo.de/magnete/magnet.htm> >, verfügbar am 20.06.2010
- /10/ TU-Ilmenau:  
Arbeitshypothesen und Versuch ihrer Verifizierung ... - URL: <[http://get-16.e-technik.tu-ilmenau.de/trafo/kompendium/02zweiwicklungssystem/09leerlauf/02arbeitshypothesen/kap02\\_09\\_02arbeitshypothesen.html](http://get-16.e-technik.tu-ilmenau.de/trafo/kompendium/02zweiwicklungssystem/09leerlauf/02arbeitshypothesen/kap02_09_02arbeitshypothesen.html)>, verfügbar am 20.06.2010
- /11/ Rudolph, Johannes:  
Vergleich von magnetischen Lagern und Untersuchungen zur Dämpfung von magnetisch gelagerten Systemen. - 2009. - 108 S. Mittweida, Hochschule Mittweida, Fachbereich Maschinenbau / Feinwerktechnik,  
Diplomarbeit, 2009

- /12/ Steffen, Roland <mail@rolandsteffen.de>:  
Magnetlager, Prinzip und Berechnungsgrundlagen. Url:  
<<http://www.rolandsteffen.de/schule.html>>, verfügbar am 30.07.2010
- /13/ Schöb, Reto:  
Theorie und Praxis der Magnetlagertechnik - eine kurze Einführung. - 60 S. ETH Zürich, 2009
- /14/ Boll, Richard:  
Weichmagnetische Werkstoffe. - 4. Auflage - Hanau: Vakuumschmelze GmbH, 1990
- /15/ Hübner, Nils:  
Erstellung eines Magnetlagerdimensionierungsprogramms - 2005. - 102 S. Mittweida, Hochschule Mittweida, Fachbereich Informations- und Elektrotechnik  
Diplomarbeit, 2009
- /16/ Fremerey, Johann K.:  
Permanentmagnetische Lager. - 42 S. Jülich: Forschungszentrum Jülich, Wissenschaftlicher Artikel, 2000
- /17/ Lang, Matthias:  
Berechnung und Optimierung von passiven permanentmagnetischen Lagern für rotierende Maschinen. - 2003. - 151 S. Berlin, Technische Universität Berlin, Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme,  
Dissertation, 2003
- /18/ Elemente der drehenden Bewegung:  
URL: <<http://www.htwk-leipzig.de/~rosenber/me.dat/me.welle/Welleweiss.pdf>>, verfügbar am 06.12.2010
- /19/ Budig, Peter-Klaus :  
Dynamisches Verhalten magnetisch gelagerter Systeme für Anordnungen, die vom Typ Welle abweichen.  
In: Tagungsband 7. Workshop Mechatronische Systeme. Zittau-Kassel: Institut für Prozesstechnik, Prozessautomatisierung u. Messtechnik, Hochschule Zittau/Görlitz, 2005
- /20/ Pavlik, Bohuslav:  
Biegeschwingungen bei magnetostraktiv erregten Kreisplatten. In: Annalen der Physik. - Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth. – 1936, 5. Folge, Band 26, Heft Nr. 7, Seite 625 – 630
- /21/ Dankert, Jürgen:  
Technische Mechanik: Statik, Festigkeitslehre, Kinematik/Kinetik. – 5. überarbeitete und erweiterte Auflage -Wiesbaden: Teubner Verlag, 2009
- /22/ Wauer, Jörg:  
Kontinuumsschwingungen. - 1. Auflage. Wiesbaden: Teubner Verlag, 2008
- /23/ Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG<info@micro-epsilon.de>:  
Glossar: Wirbelstrom. URL:<<http://www.micro-epsilon.de/glossar/Wirbelstrom.html>>, verfügbar am 12.10.2010

- /24/ Philippow, Eugen:  
Taschenbuch Elektrotechnik: Band 1 - Grundlagen. - 2. Auflage. Berlin: VEB Verlag  
Technik, 1968
- /25/ Park, R. H.:  
Two Reaction Theory of Synchronous Machines: In AIEE Transactions 48. 1929

## Anhang

Anhang 1 - Berechnung der Luftspaltfläche .....	63
Anhang 2 - Berechnung des magnetischen Kreises.....	64
Anhang 3 - Berechnung der magnetischen Spannungen .....	65
Anhang 4 - Berechnung der magnetischen Spannungen .....	66
Anhang 5 - Berechnung der Windungen für die Grunderregung .....	67
Anhang 6 - Berechnung der Windungen für die Steuererregung .....	68
Anhang 7 - Berechnung der radialen Steifigkeit .....	69
Anhang 8 - Passives Radiallager, Verschiebung in X-Richtung simuliert und berechnet.....	70
Anhang 9 - Variante 2 mit Maßen .....	71
Anhang 10 - Massenträgheitsmoment und Flächenträgheitsmoment.....	72
Anhang 11 - Läufer - Kreisring .....	73
Anhang 12 - Grundplatte mit Maßen .....	74
Anhang 13 - Sensorhalterung .....	75
Anhang 14 . Eisenkern.....	76
Anhang 15 - Befestigungswinkel der Elektromagnete .....	77
Anhang 16 - Hintransformation .....	78
Anhang 17 - Rücktransformation .....	79



**Die notwendige Luftspaltfläche:**

Luftspalt:	$\mu_0 := 1.257 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$
Mag. Feldkonstante:	$\delta := 0.5 \text{mm}$
Geforderte mag. Luftspaltinduktion :	$B_\delta := 1 \text{T}$
Geforderte Kraft pro Lager:	$F := 50 \text{N}$
Eisenfüllfaktor:	$\gamma := 0.95$

$$A_{\delta \text{ges}} := \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot F}{B_\delta^2} \quad A_{\delta \text{ges}} = 125.7 \text{mm}^2$$

Für einen Zahn ergibt sich:

$$A_\delta := \frac{A_{\delta \text{ges}}}{2} \quad A_\delta = 62.85 \text{mm}^2$$

Mit Berücksichtigung des Eisenfüllfaktors:

$$A_{\delta \gamma} := \frac{A_\delta}{\gamma} \quad A_{\delta \gamma} = 66.158 \text{mm}^2$$

**Anhang 1 - Berechnung der Luftspaltfläche**

### Berechnung des magnetischen Kreises:

Gegebene Daten:	Zahnbreite:	$b := 20\text{mm}$
	Zahndicke:	$a := 20\text{mm}$
	Statorrücken:	$l_{\text{Rücken}} := 60\text{mm}$
	Statorzahn:	$l_{\text{Zahn}} := 50\text{mm}$
	Luftspalt:	$\delta := 0.5\text{mm}$
	Rotorlänge:	$l_{\text{Rot}} := 60\text{mm}$
	Streufaktor:	$\sigma := 0.05$

### Berechnung der geometrischen Größen:

Mittlere Eisenlänge des Statorrückens:	$l_{\text{FeRück}} := l_{\text{Rücken}} - 2 \cdot \frac{b}{2}$ $l_{\text{FeRück}} = 40\text{mm}$
Mittlere Eisenlänge des Statorzahn:	$l_{\text{FeZahn}} := l_{\text{Zahn}} - \frac{a}{2}$ $l_{\text{FeZahn}} = 40\text{mm}$
Mittlere Eisenlänge des Rotors:	$l_{\text{FeRot}} := l_{\text{Rot}} - 2 \cdot \frac{b}{2}$ $l_{\text{FeRot}} = 40\text{mm}$

### Anhang 2 - Berechnung des magnetischen Kreises

Magnetische Spannung im Luftspalt:

$$H_{\delta} := \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \quad H_{\delta} = 7.955 \times 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$V_{\delta} := H_{\delta} \cdot \delta \quad V_{\delta} = 397.772 \text{A}$$

Magnetischer Fluss im Luftspalt:

$$\phi_{\delta} := A_{\delta} \cdot B_{\delta} \quad \phi_{\delta} = 7.542 \times 10^{-5} \text{Wb}$$

Verwendete Magnetisierungskennlinien:

Rotormaterial St37:

$$H_{\text{St37}} := \begin{pmatrix} 0 \\ 600 \\ 1000 \\ 1900 \\ 2780 \\ 5890 \\ 10000 \\ 20000 \\ 25000 \\ 40000 \\ 50000 \end{pmatrix} \quad B_{\text{St37}} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.8 \\ 1.2 \\ 1.4 \\ 1.5 \\ 1.7 \\ 1.8 \\ 1.877 \\ 1.904 \\ 1.96 \\ 1.98 \end{pmatrix}$$

$$BH_{\text{St37}} := \text{lspline}(H_{\text{St37}}, B_{\text{St37}})$$

$$H_{\text{Rot}} := \text{interp}\left(BH_{\text{St37}}, B_{\text{St37}}, H_{\text{St37}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{m}}, \frac{B_{\delta}}{\text{T}}\right) = \left(800 \frac{\text{A}}{\text{m}}\right)$$

Magnetische Spannung im Rotor:

$$V_{\text{Rot}} := H_{\text{Rot}} \cdot l_{\text{FeRot}} \quad V_{\text{Rot}} = 32 \text{A}$$

Magnetischer Streufluss:

$$\phi_{\sigma} := \phi_{\delta} \cdot \sigma \quad \phi_{\sigma} = 3.771 \times 10^{-6} \text{Wb}$$

### Anhang 3 - Berechnung der magnetischen Spannungen

Magnetische Spannung im Statorzahn:

Ständermaterial N.O.20:

$$B_{\text{Zahn}} := \frac{\phi_{\delta} + \phi_{\sigma}}{A_{\delta}} \quad B_{\text{Zahn}} = 1.05\text{T}$$

$$H_{\text{N.O.20}} :=$$

$$B_{\text{N.O.20}} :=$$

$$BH_{\text{N.O.20}} := \text{lspline}(H_{\text{N.O.20}}, B_{\text{N.O.20}})$$

$$H_{\text{Zahn}} := \text{interp}\left(BH_{\text{N.O.20}}, B_{\text{N.O.20}}, H_{\text{N.O.20}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{m}}, \frac{B_{\text{Zahn}}}{\text{T}}\right)$$

$$H_{\text{Zahn}} = 140.19 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$V_{\text{Zahn}} := H_{\text{Zahn}} \cdot l_{\text{FeZahn}} \quad V_{\text{Zahn}} = 5.608\text{A}$$

Magnetische Spannung im Statorrücken:

$$V_{\text{Rücken}} := H_{\text{Zahn}} \cdot l_{\text{FeRück}} \quad V_{\text{Rücken}} = 5.608\text{A}$$

Gesamtdurchflutung:

$$\Theta := V_{\text{Rücken}} + 2 \cdot V_{\text{Zahn}} + V_{\text{Rot}} + 2 \cdot V_{\delta}$$

$$\Theta = 844.368\text{A}$$

10	0
15	0.034
20	0.051
25	0.073
30	0.103
40	0.188
50	0.318
60	0.467
70	0.602
80	0.713
90	0.802
100	0.874
125	1.002
150	1.081
175	1.135
200	1.175
250	1.226
350	1.284
500	1.33
750	1.372
1000	1.398
1250	1.418
1500	1.434
2000	1.462
2500	1.487
5000	1.578
7500	1.65
10000	1.707

#### Anhang 4 - Berechnung der magnetischen Spannungen

**Berechnung der Wicklungen:**

Gegebene Daten:

Grunderregerstrom:	$I_G := 6A$
Steuerstrom:	$I_{St} := 15A$
Drahtdurchmesser Grunderregung:	$d_{DG} := 1.78mm$
Drahtdurchmesser Steuerwicklung:	$d_{DSt} := 1.24mm$
Maximale Spulenhöhe:	$h_{SpMax} := 28mm$
Maximale Spulendicke:	$d_{SpMax} := 8mm$

Windungen Grunderregung:

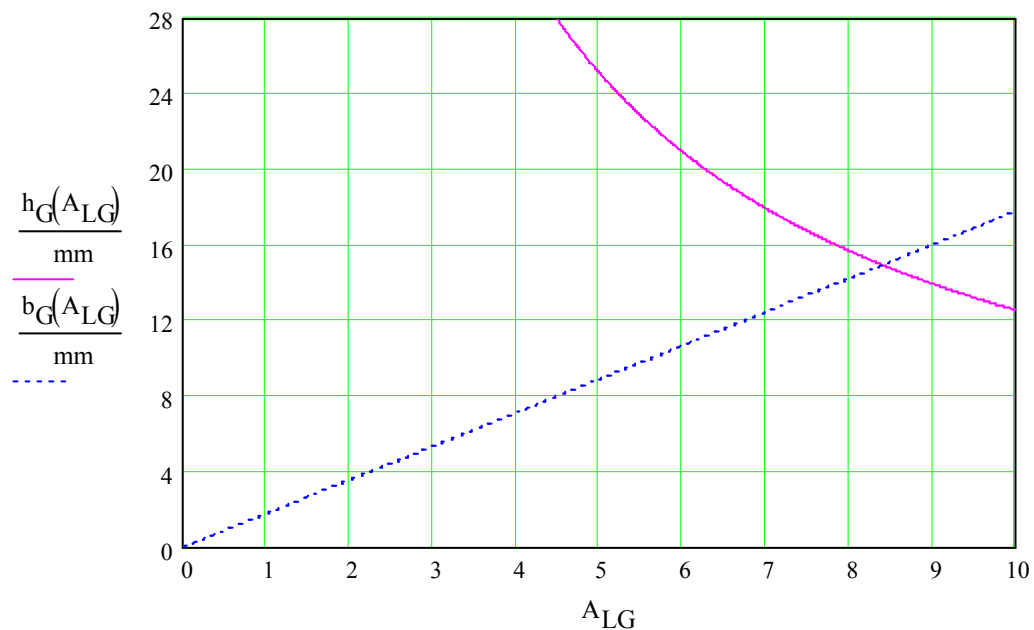
$$N_G := \frac{\Theta}{2 \cdot I_G} \quad N_G = 70.364$$

Windungen Steuerwicklung:

$$N_{St} := \frac{\Theta}{2 \cdot I_{St}} \quad N_{St} = 28.146$$

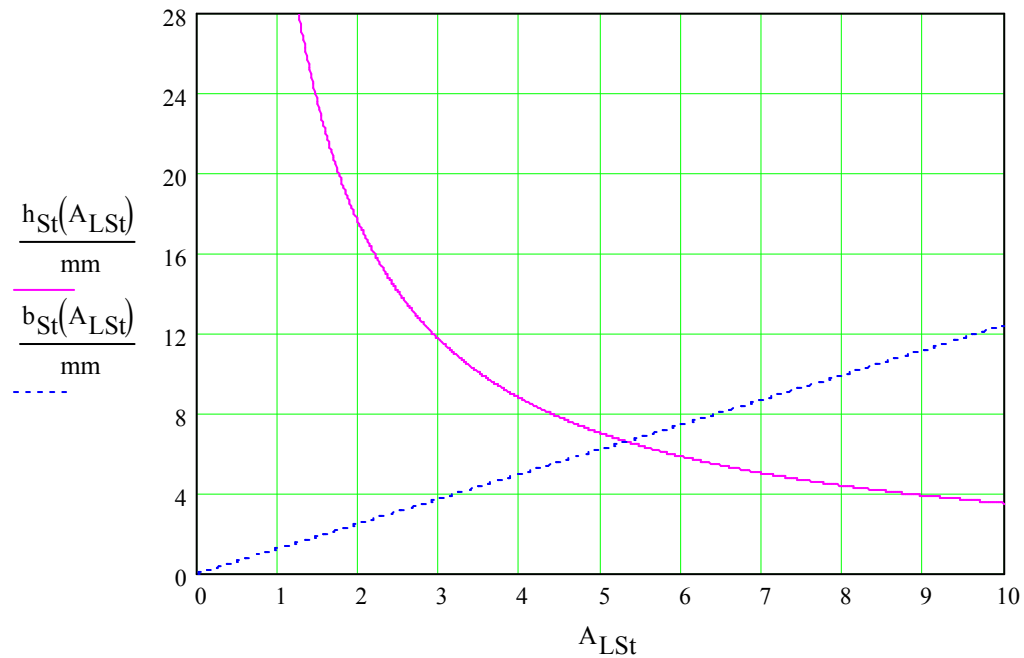
Anzahl der Lagen Grunderregung:

$$h_G(A_{LG}) := \frac{N_G \cdot d_{DG}}{A_{LG}} \quad b_G(A_{LG}) := d_{DG} \cdot A_{LG}$$

**Anhang 5 - Berechnung der Windungen für die Grunderregung**

Anzahl der Lagen Steuerwicklung:

$$h_{\text{St}}(A_{\text{LSt}}) := \frac{N_{\text{St}} \cdot d_{\text{DSt}}}{A_{\text{LSt}}} \quad b_{\text{St}}(A_{\text{LSt}}) := d_{\text{DSt}} \cdot A_{\text{LSt}}$$



#### Anhang 6 - Berechnung der Windungen für die Steuererregung

### Berechnung der radialen Steifigkeit des Radiallagers:

Gegebene Daten:

Kantenlänge:	$\lambda := 35\text{mm} + 4(9 \cdot 35\text{mm})$
Polbreite:	$b := 6\text{mm}$
Lagerspaltweite:	$w := 0.3\text{mm}$
Remanenzflussdichte:	$B_r := 1.25\text{T}$
Anzahl der Lagerspalte:	$n := 2$

Aus Tabelle für  $w/b=0,05$ :

$$\frac{w}{b} = 0.05 \quad \frac{-s_{ax}}{s_{ref}} := 0.76 \quad \frac{2 \cdot s_{rad}}{s_{ref}} := 0.70$$

Referenzdruck:

$$p_{ref} := \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B_r^2 \quad p_{ref} = 6.215 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Referenzsteifigkeit:

$$s_{ref} := n \cdot \lambda \cdot p_{ref} \quad s_{ref} = 1.61 \times 10^3 \frac{\text{k} \cdot \text{N}}{\text{m}}$$

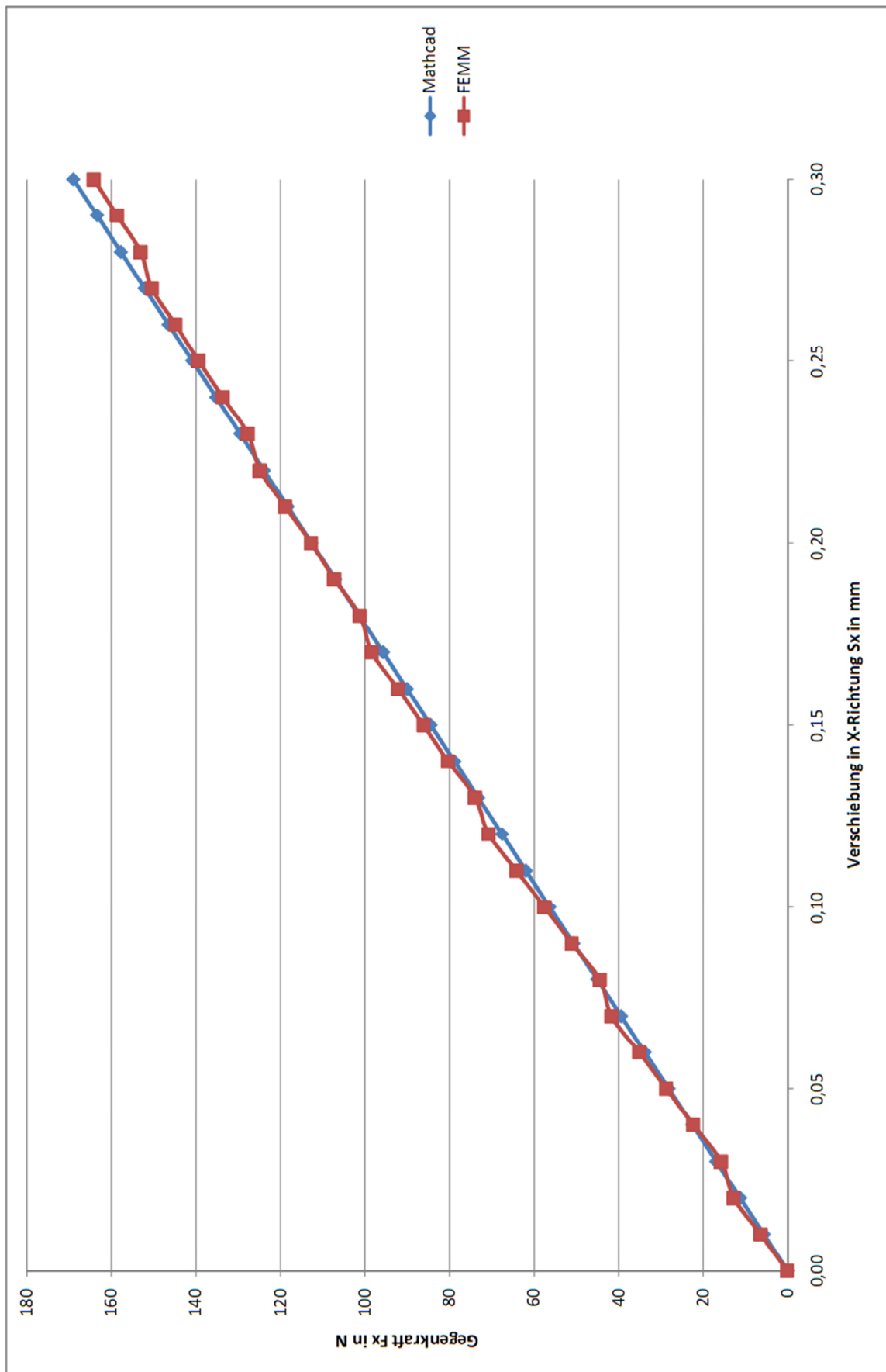
Axiale Steifigkeit für eine Lagerstelle:

$$s_{ax} := -s_{ref} \cdot 0.76 \quad s_{ax} = -1.223 \times 10^3 \frac{\text{k} \cdot \text{N}}{\text{m}}$$

Radiale Steifigkeit für eine Lagerstelle:

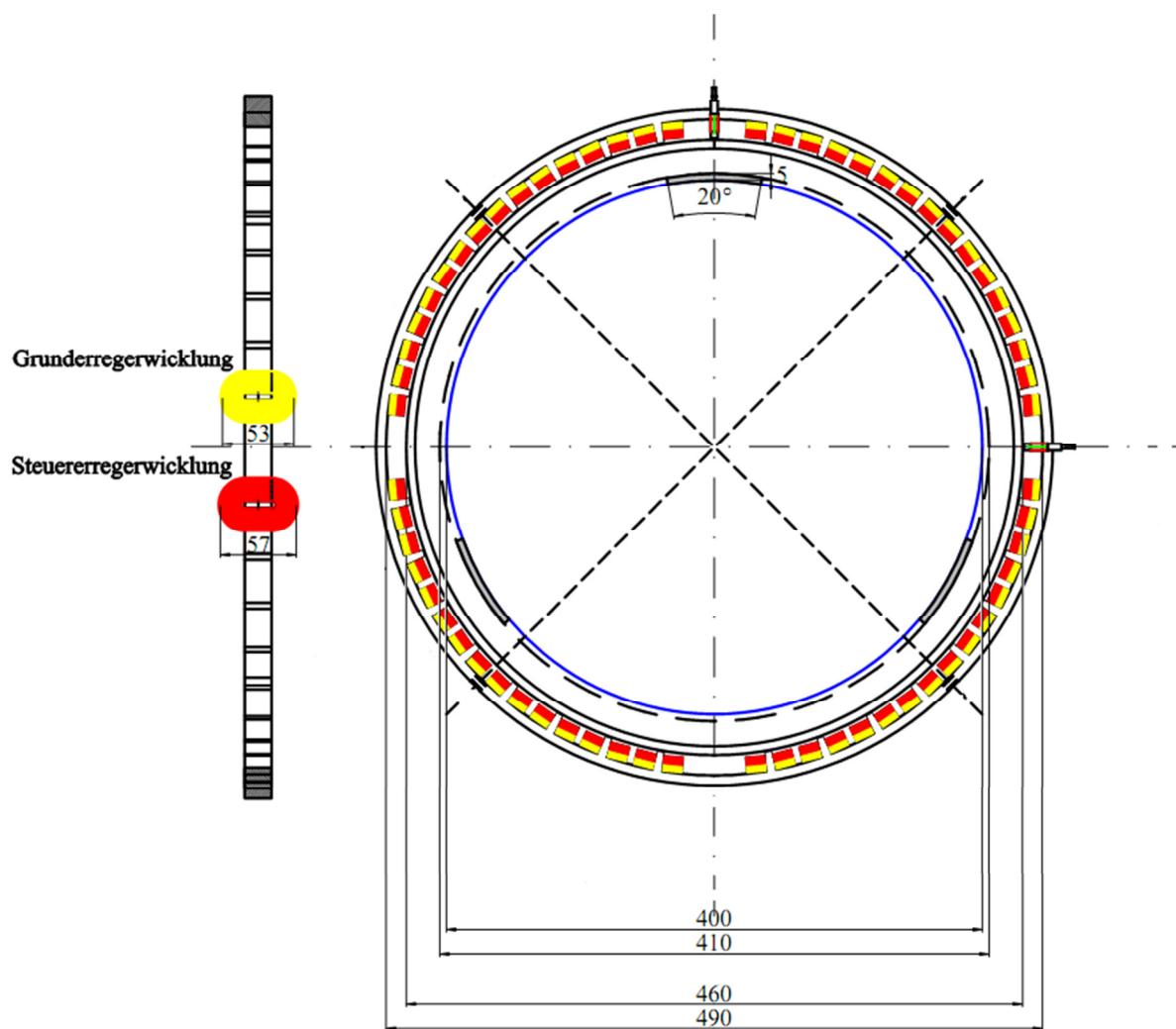
$$s_{rad} := \frac{s_{ref} \cdot 0.70}{2} \quad s_{rad} = 563.407 \frac{\text{k} \cdot \text{N}}{\text{m}}$$

### Anhang 7 - Berechnung der radialen Steifigkeit



Anhang 8 - Passives Radiallager, Verschiebung in X-Richtung simuliert und berechnet





Anhang 9 - Variante 2 mit Maßen

### Das Massenträgheitsmoment

gegebene Daten:

Masse des Kreisringes:	$M := 3.2\text{kg}$
innerer Radius:	$r := 23\text{mm}$
äußerer Radius:	$R := 55\text{mm}$

$$J_{Z\text{Kreisring}} := \frac{M \cdot (r^2 + R^2)}{2} \quad J_{Z\text{Kreisring}} = 5.686 \times 10^{-3} \text{kg m}^2$$

### Das Flächenträgheitsmoment

$$I_{Z\text{Kreisring}} := \frac{\pi}{4} \cdot (R^4 - r^4) \quad I_{Z\text{Kreisring}} = 6.967 \times 10^{-6} \text{m}^4$$

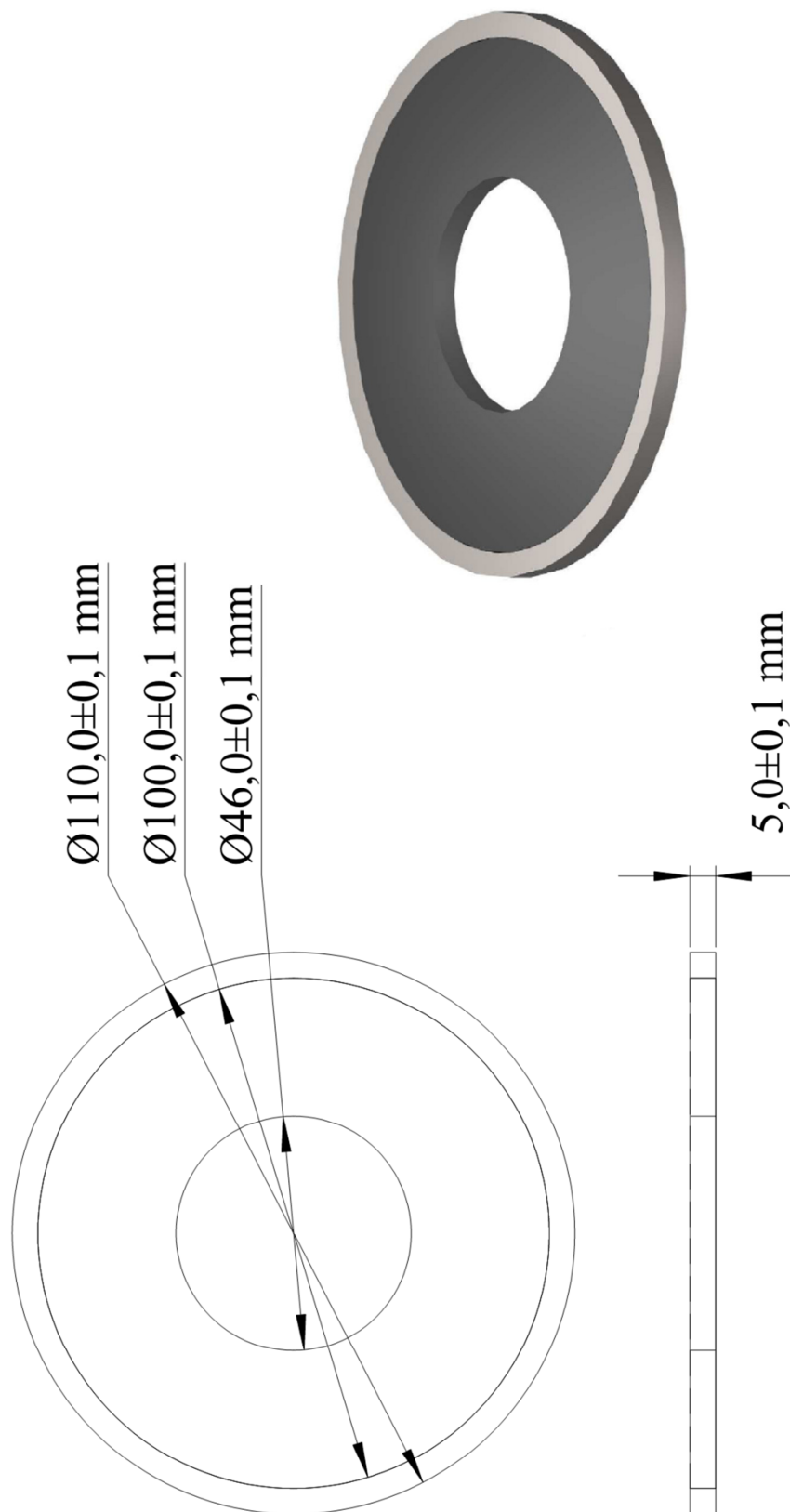
### Die Eigenfrequenz

gegebene Daten:

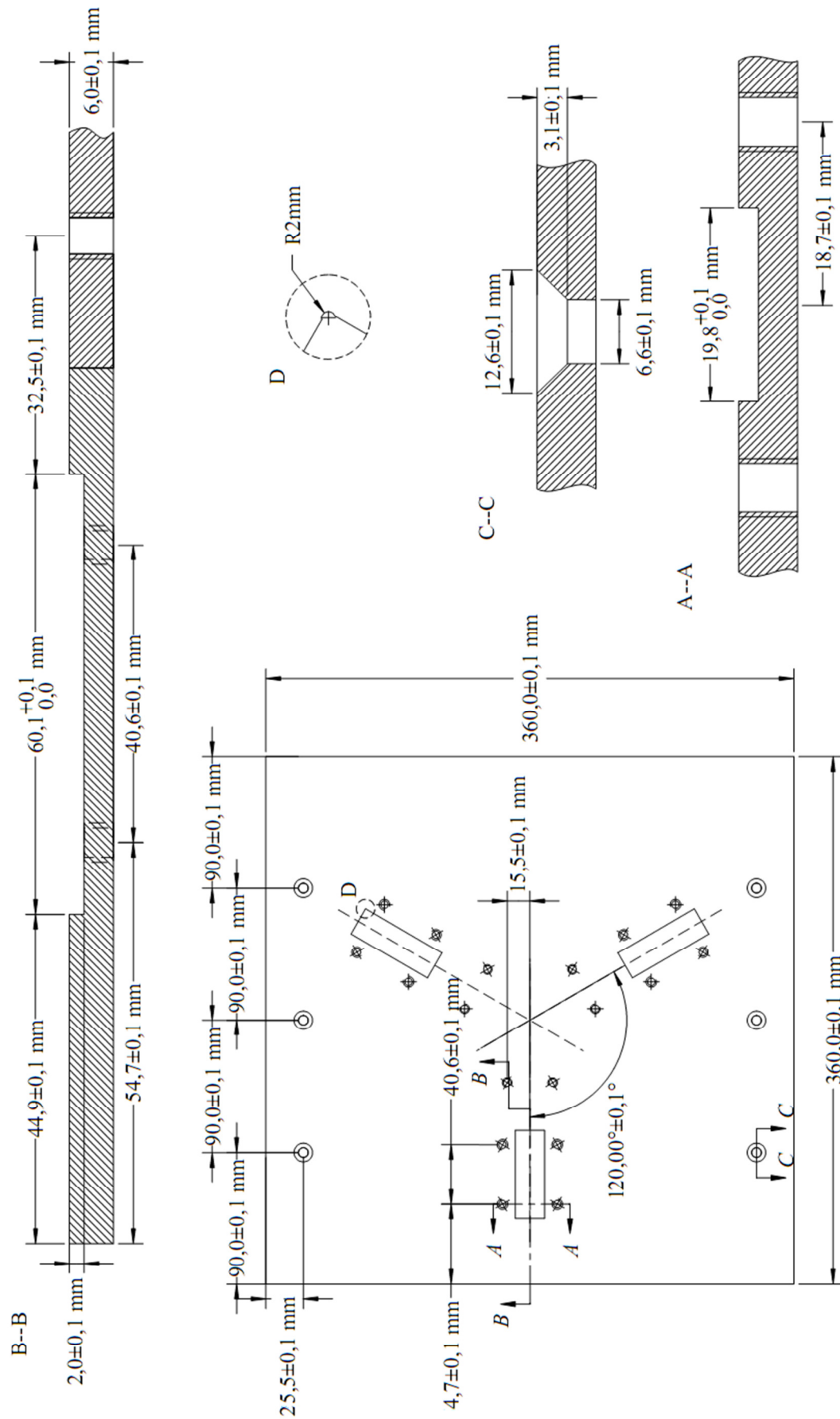
Dicke der Scheibe:	$D := 5\text{mm}$
Radius der Scheibe:	$R := 50\text{mm}$
E-Modul von Stahl:	$E := 2.1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Dichte von Stahl:	$\rho := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$$\omega := 0.261 \cdot \frac{D}{R^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \omega = 2.7\text{k}\cdot\text{Hz}$$

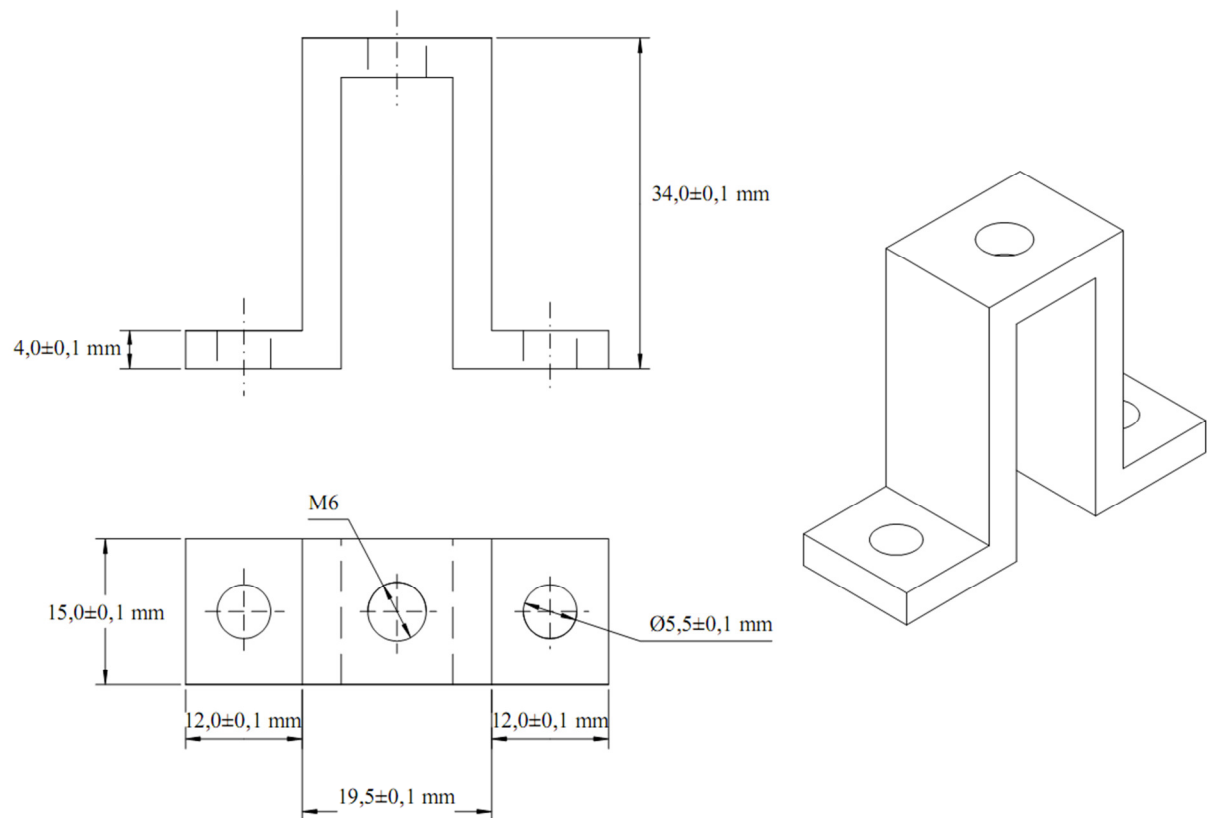
### Anhang 10 - Massenträgheitsmoment und Flächenträgheitsmoment



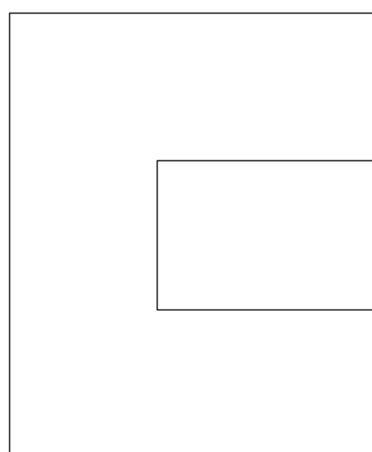
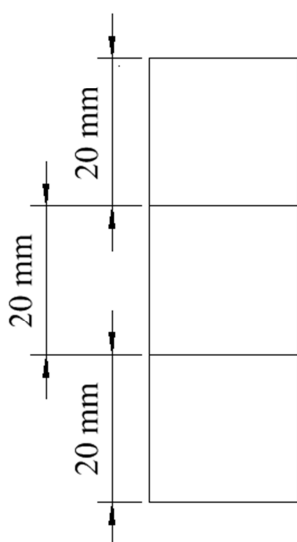
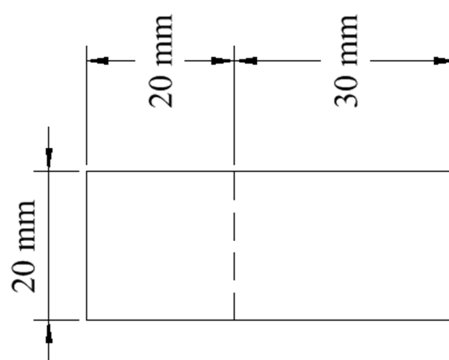
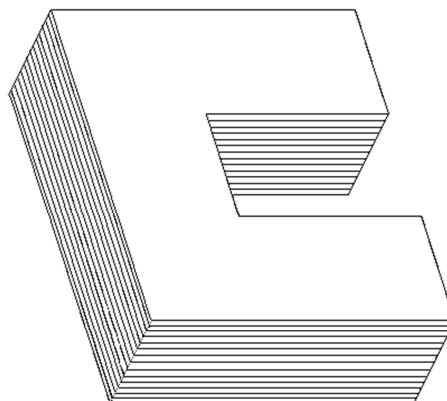
Anhang 11 - Läufer - Kreisring



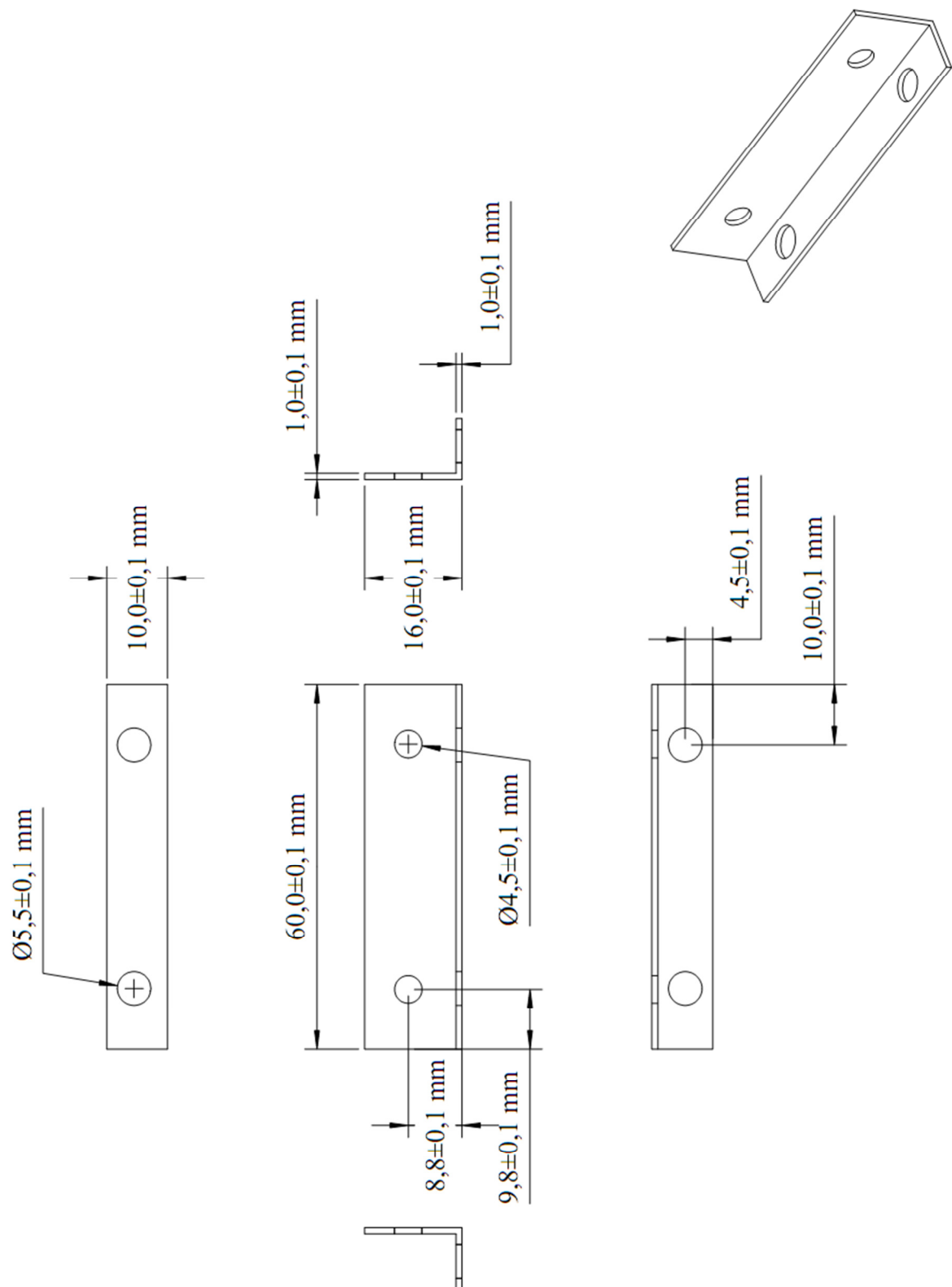
Anhang 12 - Grundplatte mit Maßen



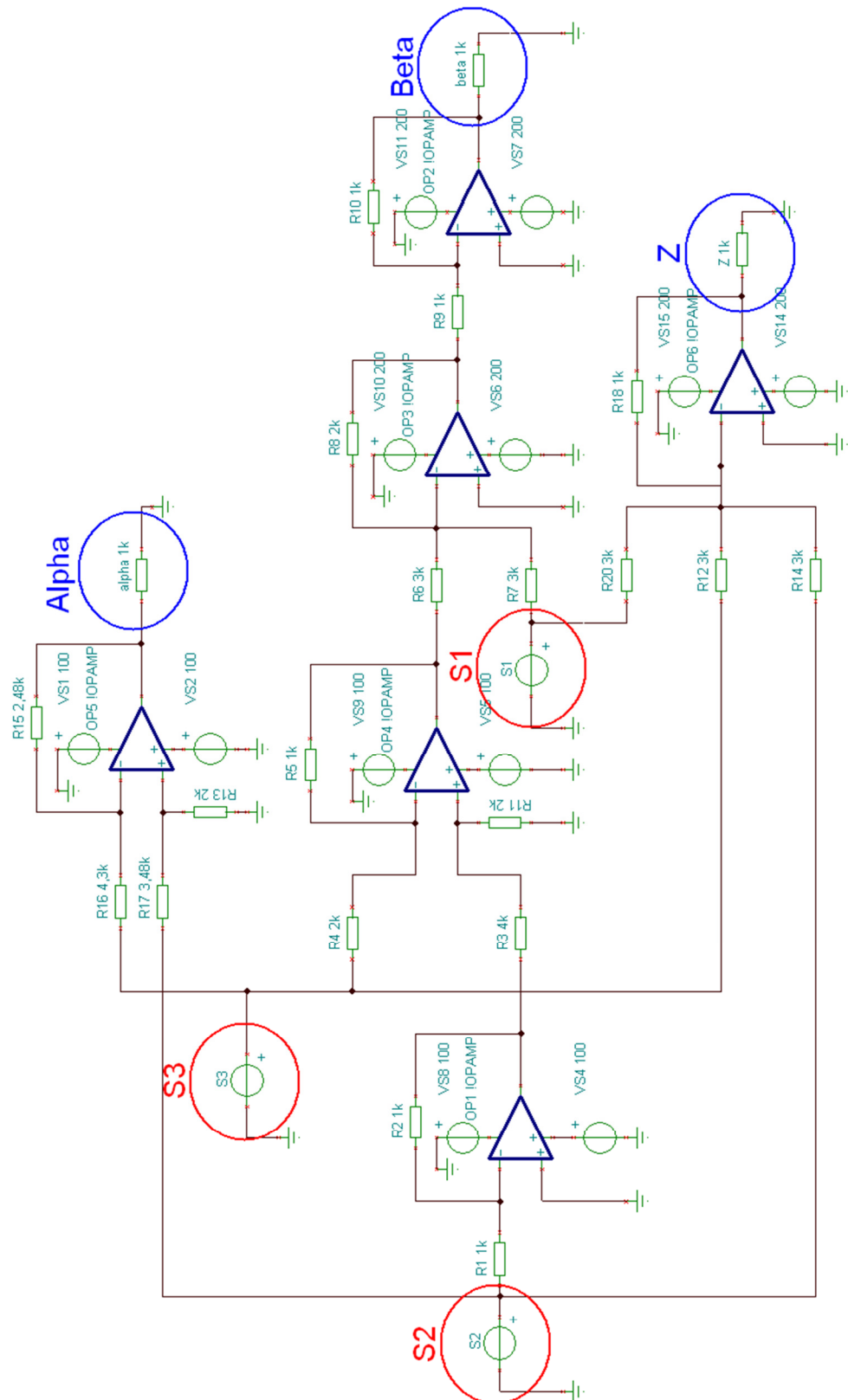
**Anhang 13 - Sensorhalterung**



**Anhang 14 - Eisenkern**

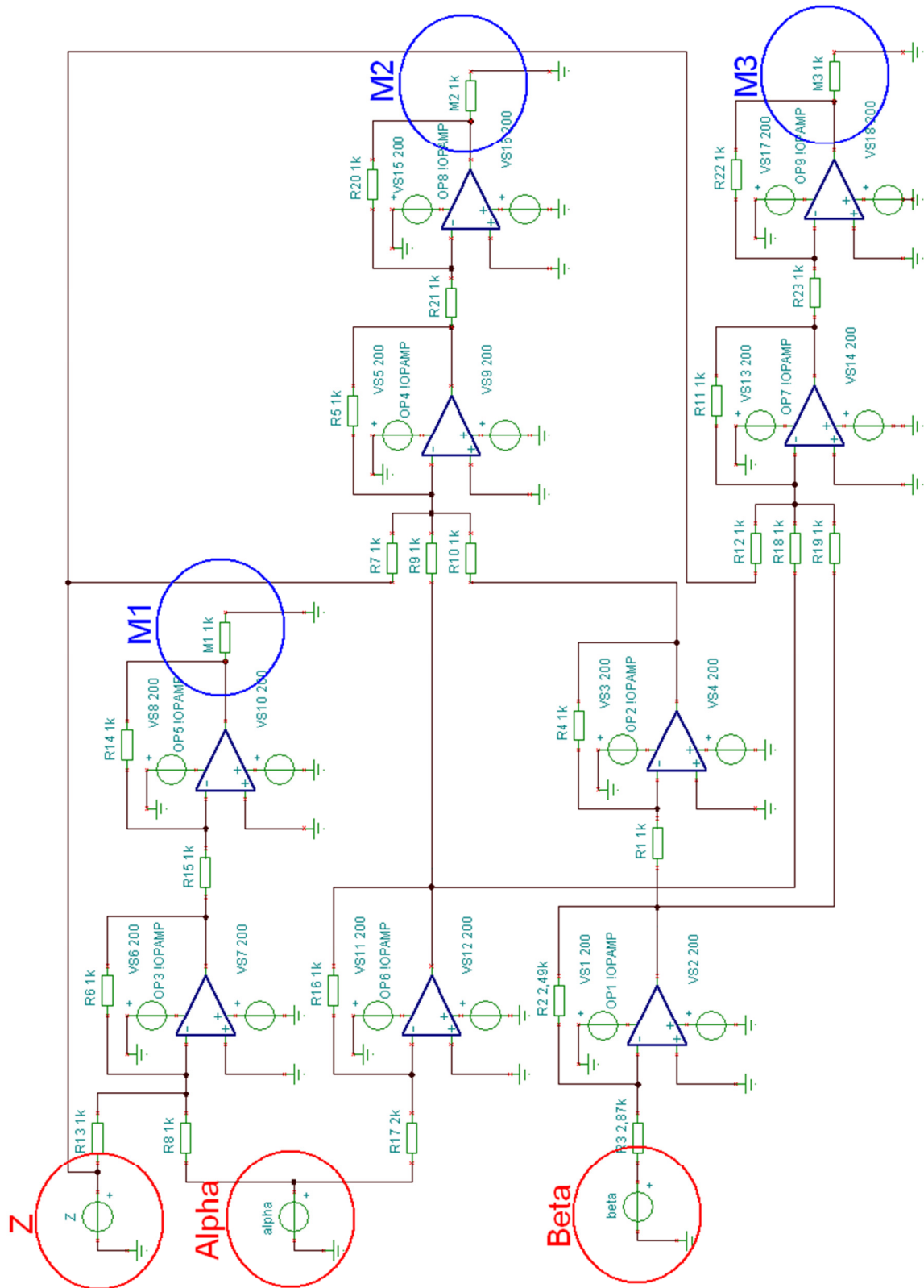


Anhang 15 - Befestigungswinkel der Elektromagnete



## Anhang 16 - Hintransformation





Anhang 17 - Rücktransformation

## **DATEN-CD**

Die gesamte Arbeit befindet sich im PDF-Format auf CD im hinteren Einband.

## **Selbständigkeitserklärung**

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Chemnitz, 06. Dezember 2010

---

Erik Sachsenweger